

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**PIENTEN SOTILASLENNOKKIEN KUSTANNUSTEHOKAS TORJUNTA ERIT-
TÄIN LYHYEN KANTAMAN ILMATORJUNTA-ASEILLA**

Pro Gradu

Yliluutnantti
Sami Haapsalo

Sotatieteiden maisterikurssi 9
Maasotalinja

Huhtikuu 2020

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 9	Linja Maasotalinja
Tekijä Yliluutnantti Sami Haapsalo	
Tutkielman nimi PIENTEN SOTILASLENNOKKIEN KUSTANNUSTEHOKAS TORJUNTA ERITTÄIN LYHYEN KANTAMAN ILMATORJUNTA-ASEILLA	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka
Aika Huhtikuu 2020	Tekstisivuja 69 Liitesivuja 7
TIIVISTELMÄ <p>Lennokkien määrä eri asevoimien kalustossa on kasvanut räjähdysmäisesti viimeisten vuosien aikana ja niiden mukanaan tuomat suorituskyyvyt aiheuttavat asevoimille haasteen, johon on kyettävä vastaamaan. Lennokkien matala hinta aiheuttaa ongelman, sillä ilmatorjuntaan suunnitellut asejärjestelmät ovat kalliita. Kustannustehokkaan torjuntakeinon löytäminen on siis asevoimille tarpeellista. Tutkimuksen tavoite on selvittää, miten pieniä sotilaslennokkeja voidaan torjua kustannustehokkaasti.</p> <p>Tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuusselvitystä sekä matemaattista mallinnusta. Kirjallisuusselvityksellä hankittiin tietoa lennokkien rakenteesta, käytössä olevista lennokeista, ilmatorjuntajärjestelmistä, kustannustehokkuudesta sekä näiden mallintamiseen tarvittavia matemaattisia menetelmiä. Matemaattisten mallinuksen kautta selvitettiin ilmatorjuntajärjestelmien osumatodennäköisyyksiä, käytön kustannuksia sekä kustannustehokkuutta. Lähdeaineistona käytettiin sotatekniikan teoksia, luonnontieteitä ja matematiikkaa käsittelevää kirjallisuutta, lennokkien ja ilmatorjuntajärjestelmien valmistajien julkaisemia esitteitä sekä uutislähteitä.</p> <p>Sähkömagneettiseen vaikuttamiseen perustuvien järjestelmien käyttökustannukset ovat erittäin matalia, vain muutamia dollareita pudotettua lennokkia kohden. Ammusasejärjestelmillä lennokin pudottaminen maksaa sadoista tuhansiin dollareita. Ohjuksia käytettäessä hinta nousee kymmeniin tai satoihin tuhansiin dollareihin. Sähkömagneettiseen vaikuttamiseen perustuvat järjestelmät ovat kuitenkin kalliita hankkia, mikä muodostaa esteen niiden kustannustehokkuudelle.</p> <p>Suoritetun tutkimuksen tulosten perusteella olalta laukaistavilla ilmatorjuntaohjuksilla saavutetaan suurin kustannustehokkuus, mikäli järjestelmällä torjutaan sen elinaikana kymmenen lennokkia tai sitä vähemmän. Tästä eteenpäin kehittyneet ammusasejärjestelmät ovat kustannustehokkaimpia lennokkien torjuntaan. Sähkömagneettiseen vaikutukseen perustuvat järjestelmät tulevat todennäköisesti olemaan kustannustehokkaita kun niiden hankintahinta saadaan pudotettua noin kymmenesosaan tämänhetkisestä tasostaan.</p>	
AVAINSANAT <p>Lennokki, UAV, UAS, ilmatorjunta, kustannustehokkuus, laser, DEW, HEL, HPM</p>	

PIENTEN SOTILASLENNOKKIEN KUSTANNUSTEHOKAS TORJUNTA ERIT- TÄIN LYHYEN KANTAMAN ILMATORJUNTA-ASEILLA

Sisältö

1.	JOHDANTO	1
1.1.	Tutkimustilanne	2
1.2.	Tutkimustehtävä	2
1.3.	Käsitteet, näkökulmat ja rajaukset	3
1.4.	Menetelmät	3
1.5.	Lähdemateriaali	4
1.6.	Käsitteet	4
2.	MIEHITTÄMÄTTÖMÄT LENNOKIT	6
2.1.	Lennokkien luokittelu	6
2.2.	Lennokkijärjestelmän rakenne	8
2.3.	Käytössä olevia lennokkeja	9
2.4.	Lennokkien haavoittuvuudet	12
3.	LENNOKKIEN TORJUNTA	18
3.1.	Ilmatorjunnan periaatteet	18
3.2.	Kineettinen vaikuttaminen	20
3.2.1.	Ammusilmatorjunta	20
3.2.1.1.	Maaliin vaikuttaminen	23
3.2.2.	Ohjusilmatorjunta	34
3.2.2.1.	Maaliin vaikuttaminen	38
3.3.	Sähkömagneettisella spektrillä vaikuttaminen	43
3.3.1.	Mikroaaltoase	44
3.3.2.	Laserase	46
4.	KUSTANNUSTEHOKKUUS	51
4.1.	Kustannustehokkuuden määrittely	51
4.2.	Kustannustehokkuuden malli	52
4.3.	Järjestelmien vertailu	52
5.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	63
5.1.	Tulokset	63
5.2.	Luotettavuus	67
5.3.	Jatkotutkimuksen mahdollisuus	69

PIENTEN SOTILASLENNOKKIEN KUSTANNUSTEHOKAS TORJUNTA

1. JOHDANTO

Lennokkien määrä niin siviili- kuin sotilaskäytössä on lisääntynyt viime vuosina merkittävästi. Kehittyneiden sensorien ja lennokkien suorituskyvyn kasvun myötä niistä on muodostunut merkittävä osa ilmauhkaa. Lennokkeja voidaan käyttää esimerkiksi tiedusteluun, maalinosoituksen ja epäsuoran tulen johtamiseen [1, s.26]. Varsinkin epäsuoran tulenkäytön johtaminen on maalla taisteleville joukoille erittäin uhkaavaa. Lennokkien kyky tuottaa reaaliaikaista tilannekuvaa sensoreillaan mahdollistaa alueella toimiville joukoille ryhmittymisen ennen taistelukoketusta, luoden etulyöntiaseman. Tämänkaltaisen taktisen edun saavuttaminen on jokaiselle sotilaille unelmien täyttymys.

Vastapuoli pyrkii varmasti hyödyntämään lennokkeja niiden tuomien etujen vuoksi. On siis oleellista pyrkiä estämään vihollisen lennokkien käyttö. Ongelman lennokkien torjunnassa aiheuttaa niiden pieni koko ja vaikea havaittavuus [2 s.12]. Ilma-aluksia vastaan luodut järjestelmät ovat lähtökohtaisesti suunniteltu erilaista maalia vastaan, suurempaa ja huomattavasti kalliimpaa. Tästä syystä on tarkoin harkittava, millä asejärjestelmällä lennokkia vastaan pyritään vaikuttamaan [2 s.12]. Muutaman tuhannen tai kymmenen tuhannen euron lennokkia ei välttämättä ole kustannustehokasta ampua alas miljoonien ilmatorjuntaohjuksella. Lennokin aiheuttamat vahingot voivat kuitenkin kasvaa merkittävästi lennokin hintaa korkeammiksi, mikäli sen toimintaa ei pyritä estämään. Pienen lennokin paikantama komentopaikka voi olla hinnaltaan kymmeniä miljoonia kalustonsa puolesta, ottamatta huomioon taistelun johdon lamaantumisesta aiheutuvia välillisiä kustannuksia. Tämänkaltaisessa tilanteessa lennokin pudottaminen kalliilla ohjuksella olisi perusteltua. Matalan hintansa puolesta lennokkeja voidaan kuitenkin tuoda taistelukentälle suuria määriä ja jossain vaiheessa kalliit ilmatorjuntaohjukset loppuvat. Kustannustehokkaiden vaihtoehtojen kartoittaminen on siis järkevää, jotta käytössä olevat räjälliset resurssit saadaan kohdennettua järkevästi.

1.1. Tutkimustilanne

MPKK:lla on suoritettu viimeisen noin kymmenen vuoden aikana useita kandidaatin ja pro gradu -tutkielmia lennokkeihin liittyen (mm. SK1501, SK1057, SK1566, SM307, SM1121, SM1271, SM1283) eri ainelaitosten alaisuudessa. Näistä varsinaisesti lennökkien torjuntaa käsitellään vain harvassa [3]. Muita aihetta käsitteleviä MPKK:n julkaisuita ovat mm. Digi-taallinen taistelukenttä (2013) ja Tuleva sota (2018).

Ulkomailla lennökkien torjuntaa on tutkittu laajemmin. Aihetta on tutkittu sekä sotilaallisesta että siviilinäkökulmasta. Pienten lennökkien torjuntaa käsitellään mm. Kanadan asevoimien maisterin tutkinnossa [4], Tšekkiläisessä Defence Science Journalissa julkaistussa tutkielmassa [5] ja Yhdysvaltain ilmavoimissa suoritetussa tutkielmassa [6]. Varsinaista useita eri asejärjestelmiä käsittelevää tutkimusta ei kuitenkaan löytynyt.

Tutkimustilanne alan osalta on jatkuvassa nousussa, mutta pirstoutunut varsin kapeisiin osa-alueisiin. Suurta mielenkiintoa myös siviilipuolella on herättänyt kaupallisten lennökkien torjunta. Varsinkin asutuskeskuksissa viranomaisten on tarkasti harkittava voimankäyttöään ja sitä miten mahdollisesti vaaralliset lennokit saadaan torjuttua aiheuttamatta liiallista vaaraa siviileille. Yliluutnantti Ivar Kullbergin Pro Gradu -tutkielma (2020) käsittelee aihetta tästä näkökulmasta. Sotilaallisessa näkökulmassa päähuomio vaikuttaa keskittyneen suunnatun energian aseisiin.

1.2. Tutkimustehtävä

Tutkielman aiheena on ”Pienten sotilaslennökkien kustannustehokas torjunta erittäin lyhyen kantaman ilmatorjunta-aseilla”. Tutkimuksen päätutkimuskysymys on:

”Miten pieniä sotilaslennokkeja voidaan torjua kustannustehokkaasti?”

Alakysymykset:

1. ”Millaisia pienet sotilaslennokit ovat?”
2. ”Miten lennokkeja voidaan torjua?”
3. ”Mitä on kustannustehokkuus lennökkien torjunnassa?”

1.3. Käsitteet, näkökulmat ja rajaukset

Tutkielma on rajattu koskemaan vain pieniä sotilaslennokkeja. Pienillä sotilaslennokeilla tarkoitetaan NATO:n UAS luokituksen I lennokkeja, eli alle 150kg painavia lennokkeja. Lennokit ovat miehittämättömiä ilma-aluksia, jotka kuljettavat mukanaan hyötykuormaa. Tämä hyötykuorma voi olla erilaisia sensoreita tai asejärjestelmiä.

Tutkitut ilmatorjuntajärjestelmät on rajattu koskemaan vain erittäin lyhyen kantaman (EKIT) ilmatorjuntajärjestelmiä. Tämä luokittelu perustuu aseiden tehokkaaseen vaikutusetaisyyteen. Erittäin lyhyen kantaman ilmatorjunnan tehokas vaakaulottuvuus on $<5\text{km}$ ja torjuntakorkeus $<3\text{km}$. Nämä kilometrilukemat eivät ole ehdottomia, mutta kuvaavat järjestelmän yleistä ulottuvuutta. [2] Eri asejärjestelmistä on valittu esimerkkejä, joita käytetään järjestelmien torjuntatehokkuuden arviointiin.

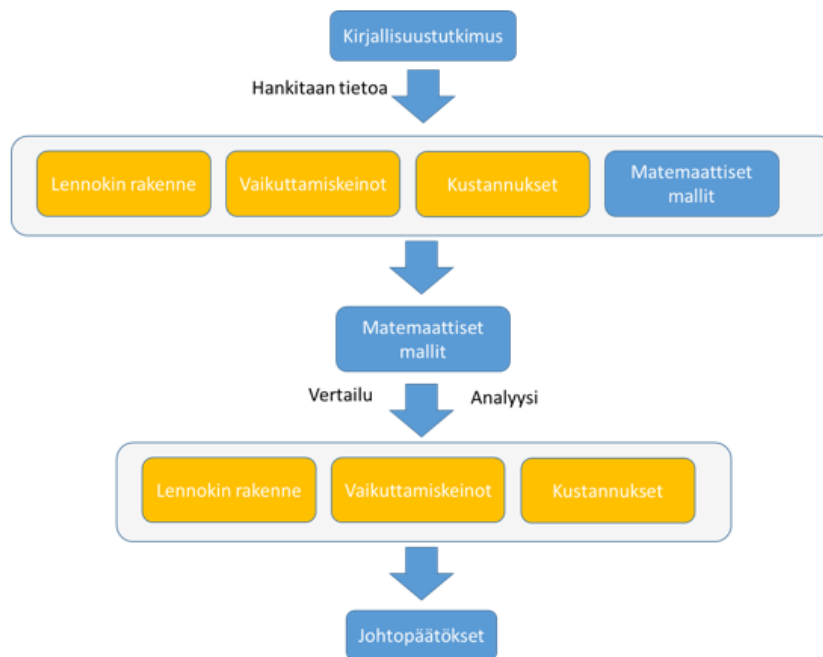
Kustannustehokkuutta on lähestytty torjuttavan järjestelmän tuhoamiseen vaaditun kustannusten kautta. Huomiotta on jätetty torjuttavan järjestelmän hinta, jolloin on saatu selville asejärjestelmien keskinäiset käyttökustannukset ja keskimääräiset kustannukset useita lennokkeja torjuttaessa.

1.4. Menetelmät

Tutkimuksessa on käytetty kirjallisuusselvitystä sekä matemaattista mallinnusta. Kirjallisuusselvityksellä selvitettiin nykyisen tutkimuksen tilanne, hankittiin tietoa käytössä olevista järjestelmistä ja niiden käyttöperiaatteista sekä käytettävistä matemaattisista malleista.

Kirjallisuustutkimus keskittyi lennokkien tekniikkaan ja rakenteeseen, ilmatorjuntajärjestelmien yksityiskohtiin sekä niiden käyttöön liittyvien matemaattisten mallien selvittämiseen. Täten luotiin tarvittavan laajan pohja tutkimukselle lennokkien ja ilmatorjunnan osalta. Lennokkien osalta valittiin kolme esimerkkijärjestelmää, joiden kautta vertailua pyrittiin suorittamaan. Ilmatorjunnan osalta pääpaino oli aseiden teknisissä yksityiskohdissa, jotta niitä voidaan soveltaa matemaattisessa mallinnuksessa.

Matemaattisella mallinnuksella selvitettiin eri asejärjestelmien vaikuttavuutta lennokkeja vastaan sekä niiden kustannustehokkuutta. Tarkoituksena oli havainnollistaa aseiden tehokkuutta eri maaleja vastaan sekä tuoda esille tehokkuuteen olennaisesti vaikuttavat tekijät. Tutkimuksen viitekehys on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Tutkimuksen viitekehys.

1.5. Lähdemateriaali

Lennokkien teknologiasta löytyy useita, varsin laajoja ja yksityiskohtaisia teoksia. Näistä mainittakoon tutkimuksessa käytetyt Unmanned Aircraft Systems (2010) [7] sekä Introduction to UAV Systems (2012) [8].

Eri asejärjestelmistä, niiden tekniikasta, luonnontieteellisistä perusteista ja yksityiskohdista on olemassa useita teoksia. Tutkimuksessa tärkeimmiksi lähteiksi tältä osalta muodostuivat Ilmatorjunnan ampumaopin käsikirja [2], Digitaalinen taistelukenttä [9] sekä Maanpuolustuskorkeakoulun perustutkinto-osaston fysiikan oppikirja [10].

Tutkimuksessa tarkastelujen lennokkien ja asejärjestelmien yksityiskohdat eivät lähtökohtaisesti ole julkista tietoa. Näiden selvittämisessä on jouduttu turvautumaan osittain internetistä löytyneeseen tietoon, joita ei voida täysin pitää luotettavana. Lukija on syytä pitää käytettyjä yksityiskohtia suuntaa antavina, eikä tarkkoina tietoina. Tutkija on parhaan kykynsä mukaan pyrkinyt löytämään arvot jotka ovat tarpeeksi lähellä totuutta vertailun suorittamiseksi.

1.6. Käsitteet

Lennokki on miehittämätön lentävä laite. Synonyymejä lennokille ovat UAV (Unmanned Aerial Vehicle), Drone. UAS (Unmanned Aircraft System), RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) käsittävät lennokin lisäksi muut sen käyttöön tarvittavat järjestelmät.

Pieni sotilaslennokki on sotilaskäyttöön tarkoitettu lennokki, jonka lentoonlähtöpaino on alle 150kg.

DEW (Direct Energy Weapon) ovat asejärjestelmiä joiden vaikutus perustuu suuritehoiseen sähkömagneettiseen säteilyyn tai suureen nopeuteen kiihdytettyihin hiukkasiin.

HPM (High-Power Microwave) on suunnatun energian ase, jonka vaikutus perustuu maalin elektroniikan tuhoamiseen suurienergisellä sähkömagneettisella pulssilla.

HEL (High-Energy Laser) on suunnatun energian ase, jonka vaikutus perustuu maalin fyysiseen vaurioittamiseen suuritehoisella lasersäteilyllä.

Kustannustehokkuus on termi joka tarkoittaa suurimman edun tai tuloksen saavuttamista käytettyihin resursseihin verrattuna.

Fyysisen vaikuttamisen järjestelmät ovat asejärjestelmiä joiden vaikutus perustuu suurella nopeudella liikkuviin ammuksiin, sirpaleisiin, räjähdykseen tai näiden yhdistelmään.

Elektromagneettisen vaikuttamisen järjestelmät ovat asejärjestelmiä joiden vaikutus perustuu sähkömagneettiseen säteilyyn.

Ammusilmatorjunta käsittää ne asejärjestelmät joilla ammutaan maalia kohden ohjautumattomia ammuksia.

Ohjusilmatorjunta käsittää ne asejärjestelmät joilla ammutaan maaliin hakeutuvia tai ohjattavia ammuksia, eli ohjuksia.

2. MIEHITTÄMÄTTÖMÄT LENNOKIT

2.1. Lennokkien luokittelu

Miehittämättömien lennokkien määrittely ja varsinkin luokittelu on haastavaa. Ala on kehittynyt hyvin nopeasti ja miehittämättömien ilma-alusjärjestelmien määrä on kasvanut räjähdysmäisesti. Tämän seurauksena valtiot ovat kehittäneet omia luokittelujärjestelmiään, jotka ovat kytköksissä niiden kansalliseen lainsäädäntöön sekä sotilaallisiin uhkakuviin ja tarpeisiin. Asiaa monimutkaistaa entisestään siviilikäyttöön tarkoitettujen lennokkien suosion kasvu. Yhdenäistä kansainvälistä standardia miehittämättömien lennokkien luokitteluun ei ole olemassa.

Sotilasilmailumääräys määrittelee *lennokin* harraste- tai urheilukäyttöön käytettäväksi laitteeksi, joka on tarkoitettu lentämään ja jonka mukana ei ole ohjaajaa. *Lentolaite* on puolestaan sotilasilmailuun käytettävä yksilöitävissä oleva tyyppihyväksymätön laite, jota kannattelevat muut kuin ilman maan tai vedenpintaa vastaan suuntaamat reaktiot. *Lentolaitteeksi* ei kuitenkaan lasketa laitetta joka on ilmaa kevyempi tai jonka lentoonlähdomassa on yli 7kg. *Miehittämättömän ilma-alus* on ilma-alus, joka on suunniteltu toimimaan ilman miehistöä siten että se kykenee hallitusti ja ohjatusti lähtemään ja palaamaan tiettyyn paikkaan. *Miehittämättömän sotilasilma-alus* on sotilasilmailussa käytettävä miehittämättömän ilma-alus, joka on merkitty sotilasilma-alusrekisteriin tai vastaava ulkomainen miehittämättömän ilma-alus. *Miehittämättömät sotilasilma-alukset* jaetaan luokkiin III ja IV, riippuen siitä kykeneekö laite sotilasilmailuun ilmatilassa jossa on muuta ilmaliikennettä (luokka IV). *Sotilaslentolaite* on miehittämättömän ilmaa raskaampi sotilasilmailuun käytettävä laite jota kannattavat muut ilman reaktiot, kuin maata tai veden pintaa vastaan suunnatut. *Sotilaslentolaitteet* jaetaan luokkiin I, IIA ja IIB. Luokan I maksimilentoonlähdomassa on 25kg ja sen lennättäjällä tulee olla jatkuva näköyhteys lentolaitteeseen. Luokan IIA sotilaslentolaitteiden lentoonlähdomainoa ei ole rajattu ja niitä voidaan lennättää myös näköyhteyden ulkopuolella, mutta ainoastaan ilmatilassa joka on sotilaskäyttöön varattu ja vastaavat maa- ja vesialueet on valvottu. IIB luokan sotilaslentolaitteiden lentoonlähdomaino on maksimissaan 25kg ja niitäkin voidaan lennättää näköyhteyden ulkopuolella. Luokan IIB laitteita voidaan lennättää muulta ilmailulta rajoitetussa ilmatilassa, jonka maa- ja vesialueet ovat avoimia (ei vaadetta valvonnalle). [11]

Sotilasilmailumääräyksen mukainen luokittelu on hyvin lavea, monimutkainen ja käsittelee asiaa kansallisen lainsäädännön ja määräysten edellyttämällä tavalla. Se ei ota kantaa miehittämättömien lentolaitteiden sotilaallisen tehtävänkuvaan tai suorituskykyyn. Luokittelun perusteena on lähinnä käyttötarkoitus siviili- tai sotilasilmailuun, käytettävän laitteen lentoonlähdomaino sekä kyky suorittaa ilmailua lennättäjän näköyhteyden ulkopuolella.

Yhdysvaltain armeijan määrittelee miehittämättömän ilma-aluksen seuraavasti: ”Miehittämättömän ilma-alus on kiinteä- tai pyöriväsiipinen ilma-alus tai ilmaa keveämpi alus, joka kykenee lentoon ilman kyydissä olevaa miehistöä. Miehittämättömään ilma-alukseen kuuluu lentoalus sekä integroidut järjestelmät joita tarvitaan lentämiseen.” Yhdysvaltain armeija luokittelee lennokit viiteen ryhmään niiden maksimilentoonlählepainon, nopeuden ja tavallisen operointikorkeuden kautta, joka on esitetty taulukossa 1 [12].

Taulukko 1. Yhdysvaltain armeija lennökkiluokitus [12].

Luokka	1	2	3	4	5
Maksimi lentoonlählepaino	<10kg	10-25kg	<600kg	>600kg	>600kg
Opertointikorkeus	<350m maanpinnan yläpuolella	<1000m maanpinnan yläpuolella	<5500m merenpinnan yläpuolella	<5500m merenpinnan yläpuolella	>5500m merenpinnan yläpuolella
Nopeus	<185km/h	<450km/h	<450km/h	ei rajoitteita	ei rajoitteita

NATO:lla on käytössään myös oma luokituksensa. NATO:n miehittämättömien lentolaitteiden luokittelu on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. NATO:n lennökkiluokitus [13]

Luokka	Kategoria	Käyttökorkeus	Normaali toimintasäde	Esimerkki
Luokka III (>600kg)	Strike/ taistelu	jopa 19,8km	Rajoittamaton (BLOS, beyond-line-of-sight)	Reaper
	HALE	jopa 19,8km	Rajoittamaton (BLOS, beyond-line-of-sight)	Global hawk
	MALE	jopa 13,7km	Rajoittamaton (BLOS, beyond-line-of-sight)	Heron
Luokka II (150kg - 600kg)	Taktinen	jopa 5,5km	200km (LOS, line-of-sight)	Hermes 450
Luokka I (< 150kg)	Pieni	jopa 1,5km	50km (LOS, line-of-sight)	Scan eagle

	Mini	jopa 900m	jopa 25km (LOS, line-of-sight)	Skylark
	Mikro	jopa 60m	jopa 5km (LOS, line-of-sight)	Black widow

NATO:n luokittelussa määrittävänä piirteenä on lentolaitteen paino, jonka mukaan ne jaetaan kolmeen luokkaan. Nämä luokat voidaan jakaa tarvittaessa kategorioihin roolin tai koon mukaan. Luokitus on yksityiskohtaisin tutkituista pienten lennokkien saralla.

Tässä tutkimuksessa käsitteellä *lennokki* tai *miehittämätön lennokki* tarkoitetaan NATO:n luokituksen I lennokkeja, eli lentoonlähätöpainoltaan alle 150kg painavia miehittämättömiä sotilaskäyttöön rakennettuja lentolaitteita. Tämän kokoluokan lennokit toimivat yleisesti ottaen pataljoonan tai sitä pienemmän osaston tukena ja niiden toimintasäde on samaa kokoluokkaa kuin epäsuorantulen tuliyksiköiden maksimikantama. Pienen kokonsa vuoksi ne ovat myös verrattain edullisia, joten niiden määrä taistelukentällä tulee todennäköisesti lisääntymään.

2.2. Lennokkijärjestelmän rakenne

Lennokkijärjestelmä koostuu itse lennokista, maa-asemasta, laukaisu- ja laskeutumisjärjestelmästä, hyötykuormasta, datalinkistä sekä tukijärjestelmästä. Lennokki sisältää lavetin (rungan), propulsiojärjestelmän, lennonhallintajärjestelmän sekä sähköjärjestelmän. Lisäksi lennokissa on mukana hyötykuorma ja oma puolensa datalinkistä, mutta näistä käsitellään omina osajärjestelminään. [8, s.8-11]

Lennokki voi olla tyypiltään kiinteäsiipinen, pyöriväsiipinen tai puhallinmoottorilla toimiva. Kiinteäsiipisen lennokin propulsiojärjestelmänä voi olla propelli tai suihkumoottori. Pyöriväsiipinen lennokki voi olla helikopterinomainen pää- ja pyrstöroottorilla varustettu tai multikopteri, jossa on useita roottoreita. Käyttövoima propulsiojärjestelmälle tuotetaan joko polttomoottorilla tai akuilla. Lennokki voi nousta ilmaan kiitotieltä, kädestä heitettynä, katapulttiavusteisesti tai suoraan ylöspäin oman voimansa avulla (VTOL, vertical take off and landing). Lennokki on lavetti, jolla hyötykuorma kuljetetaan kohteeseen. Tämä hyötykuorma voi olla vaihdettavissa ja siten tilanteen mukaan sovitettavissa tarvittavaan tehtävätyyppiin. [8, s.8-10, 73-85]

Hyötykuorma tarkoittaa niitä laitteita ja järjestelmiä joilla saadaan tuotettua lisäarvoa käyttäjälle. Sotilaslennokeissa hyötykuormana on usein jonkinlaisia sensoreita tai asejärjestelmiä. Sensoreita voivat olla erilaiset kamerat, mittalaitteet tai tutkat. Asekuormana voidaan käyttää mm. ohjuksia tai pommeja. Kannettavan hyötykuorman määrä riippuu koneen kantokyvystä ja koosta. [8, s.10]

Lennokki voi olla toiminnaltaan täysin autonominen tai ohjattava. Täysin autonomiseen lennokkiin ohjelmoidaan suoritettavat toimenpiteet ennen laitteen laukaisemista ilmaan. Tämänkaltaisen autonominen lennokki suorittaa täysin itsenäisesti sille asetetut tehtävät, esimerkiksi käsketyt reitin lentämisen, kuvien ottaminen tietyissä reittipisteissä ja palaamisen tukikohtaan. Mikäli lennokki on ohjattava tai sen täytyy välittää tietoa lentonsa aikana, tarvitsee se datalinkin. Tämä datalinkki on yleensä luonteeltaan radioteknologiaan perustuva. Datalinkin välityksellä tuodaan dataa lennokin sensoreilta käyttäjälle tai annetaan lennokille uusia tehtäviä mm. ohjauskomennot [8, s.10-11].

Datalinkin hyödyntämiseksi tarvitaan vasta-asema. Tämä vasta-asema on yleensä maalle sijoitettu ja lennokin koosta riippuen joko kannettava, siirrettävä tai kiinteä. Mikään ei myöskään estä vasta-aseman sijoittamista ajoneuvoon. Vasta-aseman kautta lennokin käyttäjä vastaanottaa lennokilta tulevaa dataa sekä antaa sille ohjauskomentoja tai käyttää muulla tavoin lennokin hyötykuormaa. Vasta-asemalta voidaan välittää kerätty tieto eteenpäin sitä tarvitseville tahoille. [8, s.8-9]

Edellä mainittujen järjestelmien avulla lennokkia on jo mahdollista käyttää täysimääräisesti, mutta vain rajoitetun ajan. Lennokkijärjestelmä vaatii vielä tukikomponentin, johon voi sisältyä lennokin huolto, ylläpito ja muu vaadittava logistiikka. [8, s.11]

2.3. Käytössä olevia lennokkeja

Tässä alaluvussa käsitellään muutamia käytössä olevia alle 150kg painavia lennokkeja. Tarkoituksena on luoda yleiskatsaus lukijalle tutkimuksessa käsiteltävän lennokkiluokan ominaisuuksista ja suorituskyvystä.

Black Hornet 3 edustaa pienimpiä käytössä olevia sotilaslennokkeja. Se on malliltaan helikopterimainen ja varustettu kaksilapaisella pääroottorilla sekä pyrstöroottorilla. Valmistaja ilmoittaa sen kokonaismitaksi vaivaiset 16,8cm, leveyden ollessa 12,3cm (lapojen kärjestä kärkeen) ja korkeus on kuvista arvioituna noin 4-5cm. Voimanlähteenä toimii vaihdettava akku, jonka luvataan antavan jopa 25 minuutin toiminta-aika. Aktiivisessa käytössä akku kestää luultavasti lyhyemmän aikaa. Painoksi ilmoitetaan alle 33g. Lennokin maksiminopeus on 6m/s ja datalinkin mahdollistama maksimikantama 2km. Maksimilentokorkeus on yli 1000m. [14; 15; 16]

Hyötykuorma on vaihdettava, joko elektro-optinen päiväsensori tai pimeätoimintaan tarkoitettu elektro-optinen / lämpökamera -sensori. Päiväsensori koostuu kahdesta kamerasta, joilla kytetään tuottamaan 1600x1200 pikselin resoluution kuvia tai 640x480 pikselin resoluution videokuvaa. Pimeäsensori on elektro-optinen kamera ja lämpökamera, joka kykenee 160x120 pikselin resoluution kuviin ja videokuvaan. Pienen kokonsa takia sääolosuhteet rajoittavat lennokin käyttöä. Valmistajan mukaan sitä voidaan lennättää vain alle 7,8m/s tuulessa ja se ei siedä yli 2,5mm/h sadetta. [14, 15, 16]

Black Hornet 3:n datalinkki on kryptattu ja siinä on dynaaminen lähetystehonsäätö akunkeston pidentämiseksi. Valmistajan mukaan lennokkia voidaan myös lennättää suoran näköyhteyden ulkopuolella (BLOS). Datalinkin kerrotaan myös mahdollistavan taajuushypynnän. [14, 15, 16] Valmistaja ei ilmoita käytettävää taajuuskaistaa, mutta Defence & Security Systems International:n artikkelin mukaan Black Hornet toimi samalla taajuuskaistalla Yhdysvaltain hätätaajuuksien kanssa [17]. IHS Jane's:n mukaan ajoneuvoon asennettu Black Hornet järjestelmä voi käyttää yhtä tai kahta UHF-alueen taajuutta lennokkien lennättämiseen [14]. Yhdysvalloissa valtakunnalliseen käyttöön varatut VHF ja UHF taajuudet vaihtelevat 146,52 MHz:istä 1294,5 MHz:iin [18]. Black Hornet toimii siis todennäköisesti UHF-taajuuksien alueella (0,3-3GHz). Navigointijärjestelmä on satelliittipaikannuspohjainen ja sillä on kyky toimia ohjattuna GPS-yhteyden katkettua. Lennokki voidaan myös ohjelmoida lentämään tietty reitti ja suorittamaan toimenpiteitä tietyissä reittipisteissä sekä palaamaan käskettyyn paikkaan. Tarvittaessa lennolla kerätty data voidaan tallentaa AES 256 -kryptattuna muistikortille. [14, 15, 16]

Järjestelmää ohjataan yksikäsisellä ohjaimella, joka välittää ohjaussignaalin (mahdollisesti näyttöpäätteen kautta) lennokille. Näyttöpääte näyttää ja tallentaa lennokin sensorien tuottamaa dataa ja varoittaa käyttäjää mm. GPS-signaalin menetyksestä siirtyessään manuaaliohjaukseen. Järjestelmä koostuu kahdesta lennokista ja ohjaimesta, joita säilytetään tukiasemassa, sekä näyttöpäätteestä. Järjestelmän kokonaispaino on 1,3kg ja se on helposti yhden taistelijan kuljettavissa ja käytettävissä. [14, 15, 16]

Black Hornet -järjestelmää käytetään ryhmä- tai joukkuetason toiminnan tukemiseen. Se mahdollistaa lähiympäristön tiedustelun ihmishenkiä vaarantamatta. Pienen kokonsa ja herätteensä puolesta sitä on vaikea havaita. Vaikka lennokki havaittaisiin, on siihen erittäin vaikea osua käsiaseiden tulella, varsinkin jos lennokki on liikkeessä.

Orlan 10 on venäläisvalmisteinen lentokonemainen lennokki, joka kuuluu Orlan-lennokkiperheeseen. Muita tähän perheeseen kuuluvia lennokkeja ovat Orlan 30 sekä Orlan 50, jotka ovat suurempia ja voivat kantaa suuremman hyötykuorman. Orlan 10 -lennokista on olemassa myös Orlan 10M (modernisoitu) sekä Orlan 10E (vientimalli) -versiot. Lennokki on pituudeltaan 1,8m pitkä ja sen siipien kärkiväli on 3,1m. Voimanlähteenä toimii nokkaan sijoitettu polttomoottori. Lennokin perus- ja vientiversioille luvataan 10 tunnin toiminta-aika ja modernisoidulle versiolle 14 tuntia. Arvioitu maksimilento-ohjelmakäyttöaika on 10M ja 10E -malleille 18kg ja perusmallille 14kg. Hyötykuorman osuudeksi jää 3kg 10M ja 10E -malleille, perusversion jaksassa kantaa puoli kiloa vähemmän. Lennokin maksiminopeus on 150km/h. Maksimilentokorkeus on 5000m. Toimintasäteeksi perusmallille ilmoitetaan 98km ja modernisoidulle- ja vientiversiolle 150km. [19]

Orlanin hyötykuormana voidaan kantaa stabiloituja kameroita tai pimeänäkölaitteita. Se voidaan myös varustaa elektronisen sodankäynnin välineillä, mm. GSM/3G/4G -alueen häirintälähettimillä ja se kykenee imitoimaan puhelinverkkojen tukiasemia ja täten kaappaamaan tätä reittiä kulkevaa dataa. Näillä häirintälähettimillä voidaan myös häiritä muiden lennokkien navigointijärjestelmiä. [19]

Orlanin datalinkistä ei ole juurikaan luotettavaa tietoa, mutta sen ilmoitetaan olevan häirintäsietävä [19]. Ukrainalaisperusteinen InformNapalm on järjestö, jonka tarkoituksena on selvittää ja paljastaa Venäjän asevoimien toimintaa Ukrainassa. Järjestön esittämän kuva-aineiston [20] perusteella telemetrialähetin perustuu ATxmega256A3 mikrokontrolleriin, jonka taajuusalue on 902-928MHz, joka on kytketty 915MHz:n antenniin. Täten on oletettavaa, että datalinkki toimii UHF-taajuusalueella. Navigointiin Orlan käyttää satelliittipaikannukseen, inertiaan ja magneettikompassiin perustuvaa järjestelmää [19]. Yhtä lennokkia järjestelmässä voidaan käyttää tukiasemana maa-aseman ja muiden lennokkien välillä [19]. Lennokki voidaan todennäköisesti ohjelmoida lentämään reitti autonomisesti.

Järjestelmään kuuluu ainakin maa-asema, yhdestä neljään lennokkia ja katapultti jolla lennokit laukaistaan ilmaan. Laskeutuminen tapahtuu laskuvarjolla. Lennokkeja voidaan käyttää myös osana LEER-3 elektronisen sodankäynnin järjestelmää. [19]

RQ-21A Blackjack on Yhdysvalloissa valmistettu lennokka, jonka propulsioratkaisuna on perään sijoitettu propelli. Se on 2,5m pitkä ja sen siipien kärkiväli on 4,8m. Sen voimanlähteenä toimii 6kW polttomoottori, joka kykenee käyttämään JP-5 ja JP-8 polttoaineita. Blackjack:n toiminta-ajaksi ilmoitetaan maksimissaan 16 tuntia. Lennokka kykenee noin 150km/h nopeuteen ja sen toimintasäde on 92km. Maksimilentoonlählepaino on 62kg, josta hyötykuorman osuus on 17kg. Maksimilentokorkeus on noin 6000m. [21, 22]

17kg:n hyötykuorma mahdollistaa monipuolisen varustuksen. Standardikokoonpanossa lennoksissa on elektro-optinen kamera, 3-8µm alueen lämpökamera, infrapuna-alueen maalinsoituslaite, laseretäisyysmittari, omatunnistejärjestelmä sekä välitysasemana toimimiseen tarvittava laitteisto. Valmistaja lupaa 350W tehon hyötykuormalle, ethernet liitettävyyden sekä datan kryptauksen. Konetta on myös käytetty SAR-tutkien testaukseen. Järjestelmän datalinkistä tai navigointijärjestelmästä ei kerrota muuta kuin että se kykenee autonomiseen lähtöön ja laskuun. [21, 22]

Järjestelmään kuuluu viisi lennokkia, kaksi maa-asemaa sekä laukaisu- ja laskeutumisjärjestelmä. Lennokin laukaisuun käytetään paineilmatoimista katapulttia. Laskeutumisjärjestelmänä toimii SkyHook sieppausjärjestelmä. [21]

Pieneten sotilaslennokkien hyötykuormana näytetään suosivan erilaisia kameroita ja niillä on kaikilla pimeätoimintakyky. Järjestelmien datalinkit toimivat todennäköisesti UHF-alueella. Pienimmissä lennokeissa näytetään suosivan voimanlähteenä akkuja, mutta kymmenien kilojen painoiset lennokit käyttävät polttomoottoreita. Tämä johtuu todennäköisesti suuremmasta säävutettavasta toiminta-ajasta.

2.4. Lennokkien haavoittuvuudet

Lennokkijärjestelmä koostuu seuraavista osajärjestelmistä: lennokka, hyötykuorma, datalinkki, laukaisujärjestelmä, laskeutumisjärjestelmä, maa-asema, sekä tukijärjestelmä (huolto yms.) [7; 8]. Mietittäessä hyökkäysvektoria lennokkijärjestelmää vastaan, on tarkasteltava erikseen jokaisen osajärjestelmän haavoittuvuuksia sekä niiden välisten rajapintojen haavoittuvuuksia.

Lennokki on lennokkijärjestelmän lavetti, joka kuljettaa hyötykuorman (sensorit, aseet, vaikutamisjärjestelmän) kohteeseen. Lentävänä laitteena sille on elintärkeää pysyä lentokelpoisena, sillä muuten lennokki putoaa maahan eikä kykene suorittamaan tehtäväänsä. Pysyäkseen lentokelpoisena lennokki tarvitsee tarpeeksi nostetta voittaakseen maan vetovoiman [8, s.38]. Tämä noste voidaan tuottaa joko olemalla ilmaa kevyempi, tai tuottamalla noste siivillä. Siivillä tuotettu noste saadaan aikaan pyöriväsiipisissä lennokeissa propellilla, joka on kohtisuoraan maanpintaa vastaan. Kiinteäsiipinen lennokki vaatii siivet sekä työntövoiman jolla lennokki saatetaan tarvittavan suureen nopeuteen, jolloin siipien tuottama noste on riittävä nostaakseen lennokin irti maasta. [8, s.35-49]

Sekä pyörivä- että kiinteäsiipiset lennokit tarvitsevat moottorin energian tuottamiseen. Tämä moottori voi saada voimansa joko akusta tai polttoaineesta [8, s.78]. Jotta lennokki lavettina kyetään tekemään toimintakyvyttömäksi, on siis pystyttävä vaikuttamaan johonkin seuraavista osajärjestelmistä: nosteen tuotto (ilmaa kevyemmät), siivet, moottori tai energian tuotto. Jokainen näistä on osa lennokkia. Vaikuttaminen näihin osajärjestelmiin vaatii rakenteellisen vaurion tuottamista, jotta ne saadaan tehtyä toimintakyvyttömiksi. Rakenteellinen vaurio voidaan saada aikaan fyysiseen vaikuttamiseen perustuvalla järjestelmällä tai suurteholaserilla. Vaurioittamalla moottorinohjaukseen vaadittavaa elektroniikkaa, voidaan myös korkeatehoisella mikroaaltoaseella tuhota lennokki.

Hyötykuormaan, eli lennokin tehtävän kannalta tärkeimpään osaan [8, s.10], vaikuttaminen riippuu hyötykuorman laadusta. Mikäli lennokki kantaa sensoreita, esimerkiksi kameroita tai laseretäisyysmittareita, voidaan niihin vaikuttaa joko sokaisemalla, vaurioittamalla tai tuhoamalla sensori [23, s.40-47]. Sensorin sokaiseminen vaatii sen vastaanottimen kyllästämisen paluusignaalia vastaavalla läheteellä. Tämä voidaan toteuttaa tarkoitusta varten rakennetulla laitteella, joka kykenee muiden järjestelmien avulla havaitsemaan lennokin ja suuntaamaan vastasignaalin sitä vastaan. Sensorin vaurioittaminen vaatii edellä mainitun lähetteen tehon kasvattamista niin suureksi, että sensorin rakenne ei sitä kestä tai hyökkäystä sensorin muita osia, esimerkiksi optiikkaa tai piirilevyjä vastaan [23, s.44-47]. Tämän toteuttaminen on mahdollista vastalähetteen tehoa kasvattamalla, lähetteen vaikutuksen suuntaamisella haavoittuvia osia vastaan tai fyysisellä vaikuttamisella. Sensorin tuhoaminen vaatii edellä mainittujen keinojen vaikutustehon kasvattamista tai fyysistä vaikuttamista.

Datalinkki on lennokin ja maa-aseman välinen tiedonsiirtoon tarkoitettu tiedonvälityskanava, joka on yleensä toteutettu radioteitse [8, s.189]. Datalinkkiin sisältyvät lennokille annetut ohjaus- ja tehtäväkomennot sekä lennokin maa-asemalle välittämä sensoridata [8, s.191]. Vaikuttaminen tähän osajärjestelmään vaatii joko lennokin ja maa-aseman välisen viestiliikenteen katkaisemista (häirintää) [23, s.39] tai tiedonvälitykseen käytettyjen laitteiden vaurioittamista tai tuhoamista. Viestiliikenteen katkaisuun voidaan käyttää samankaltaista toimintatapaa kuin sensorien sokaisuun. Asettamalla lähete joka on lennokin tai maa-aseman vastaanottimen taajuudella, sekä teholtaan suurempi kuin varsinainen lähete, voidaan vastaanotin ”sokaista”. Häiritty vastaanotin ei kykene lukemaan varsinaista signaalia. Kyseisten laitteiden vaurioittaminen ja tuhoaminen vaatii joko voimakkuudeltaan ylisuurta lähetettä tai fyysistä vaurioittamista.

Navigointijärjestelmä on lennokin osajärjestelmä, joka vastaa suunnistamisesta. Navigointiin voidaan käyttää useita menetelmiä, joista yleisimmät ovat satelliittipaikannus, inertiapaikannus ja radiosuunnistus [7, s.169-172]. Satelliittipaikannus perustuu avaruudessa oleviin satelliitteihin, joissa on hyvin tarkka atomikello. Satelliitit lähettävät omaa aikadataansa tietyllä taajuudella, jonka vastaanotin havaitsee. Saadessaan lähetteen useammalta satelliitilta, järjestelmä kykenee laskemaan oman sijaintinsa kolmiomittauksella [7, s.169]. Satelliittipaikannukseen on käytössä useita järjestelmiä kuten GPS, GLONASS ja Galileo. Satelliittipaikannuksessa on mahdollista käyttää yhtä tai useampaa järjestelmää. Tähän navigaatiojärjestelmään voidaan vaikuttaa häiritsemällä satelliittien lähettämää signaalia, tuhoamalla tai vaurioittamalla vastaanotinta tai tuhoamalla satelliitit, joskin viimeinen vaihtoehto on huomattavan kallis ja vaikea toteuttaa.

Inertianavigointi perustuu laitteen kiihtyvyyden mittaamiseen [7, s.171]. Järjestelmälle syötetään tarkka paikkatieto lähtöpisteessä ja järjestelmä laskee sijaintinsa kiihtyvyydestä saadun tiedon avulla [7, s.171]. Järjestelmä vaatii gyroskooppeja tai lasergyroskooppeja suuntatietonsa määrittämiseen. Vaikuttaminen tätä osajärjestelmää vastaan vaatii fyysistä vaikuttamista laitteisiin tai antureiden häiritsemistä. Radiosuunnistus perustuu radiomajakoihin, joiden sijainti tiedetään. Lennokki laskee sijaintinsa kolmiomittauksella näistä majakoista saamiensa lähetteidensä perusteella. Vaikuttaminen järjestelmään vaatii joko vastaanottimen häiritsemistä tai tuhoamista tai radiomajakoiden vaurioittamista tai tuhoamista. Huomionarvoista on, että lennokit käyttävät usein monia keinoja sijaintinsa määrittämiseen, jolloin tarvittaessa on kyettävä vaikuttamaan näihin kaikkiin. Lennokki voi myös siirtyä täysin manuaaliseen lentotilaan menettäessään sijaintitietonsa [7, s.12], jolloin myös ohjaussignaaliin on kyettävä vaikuttamaan.

Laukaisujärjestelmänä voidaan lennokin tyypistä riippuen käyttää ihmistä, katapulttia tai nousua lennokin omalla voimalla [7, s.9-10; 8, s.12]. Jotta vaikuttaminen tähän osajärjestelmään olisi mahdollista, olisi sen sijainti tiedettävä etukäteen. Fyysinen vaikuttaminen on ainoa keino vaikuttaa tähän osajärjestelmään. Laskeutumisjärjestelmänä voi toimia laskuvarjo tai laskeutuminen lennokin omin toimenpitein. Laskuvarjoja käytettäessä lennokka lentää tietylle alueelle, hidastaa nopeuttaan riittävästi ja avaa varjonsa. Tämän jälkeen lennokka leijailee maahan, josta se noudetaan. Itsenäisesti laskeutuvat järjestelmät vaativat joko kiitotien (tai vastaavan) tai ne kykenevät laskeutumaan pystysuoraan. Vaikuttaminen lennokkiin tässä vaiheessa ei liene edullista, sillä se on jo saanut suoritettua tehtävänsä. Vaikuttamisen keinona toimii kuitenkin fyysinen vaikuttaminen, jolla vaurioitetaan tai tuhotaan laskuvarjo, kiitotie tai laskeutumisalue. Lennokka voi mahdollisesti vaihtaa laskeutumisaluettaan havaitessaan sen tuhotuksi.

Maa-asemasta ohjataan lennokkia, annetaan sille tehtäviä sekä vastaanotetaan ja jaetaan lennokin tuottamaa sensoridataa [8, s.9]. Maa-aseman koko ja sijainti riippuu lennokin koosta. Maa-asemaa vastaan suunnattu vaikuttaminen on kohdennettava aikaisemmin mainittuun datalinkkiin tai itse asemaan. Asemaan vaikuttaminen vaatii fyysistä vaikuttamista tai elintärkeiden osajärjestelmien, kuten ohjauspaneelin, vaurioittamista tai tuhoamista. Asemaan vaikuttamisen haasteena on sen sijainnin selvittäminen. Asema voidaan paikallistaa mm. suuntimoasemilla [23, s.33-39], mutta se voi sijaita liian kaukana fyysiseen vaikuttamiseen kykenevistä järjestelmistä. Huomionarvoista on, että lennokka saattaa siirtyä automaattiseen tilaan havaittuaan ohjaussignaalin syystä tai toisesta katkennon, jolloin sen keräämä data on mahdollisesti käytettävissä lennokin laskeuduttua esivalitulle laskeutumisalueelle. Lennokkia voidaan myös mahdollisesti ohjata toisesta kantaman sisäpuolella olevasta maa-asemasta, jolloin molempiin (tai useampaan) asemiin on kyettävä vaikuttamaan järjestelmän lamauttamiseksi. Tukijärjestelmiin vaikuttaminen ei suoranaisesti estä lennokin toimintaa, mutta hidastaa sen toimintaa tulevaisuudessa, tai estää sen kokonaan, mikäli tukijärjestelmä on lennokin toiminnan kannalta kriittinen ja sitä ei kyetä korvaamaan. Vaikuttamisen keino riippuu kohteen laadusta, mutta fyysinen vaikuttaminen on mahdollista kaikkia vastaan. Toimintaa voidaan häiritä myös sähkömagneettisin keinoin, esimerkiksi estämällä viestiliikenne.

Tarkasteltaessa eri osajärjestelmiä ja niiden haavoittuvuuksia, kineettinen vaikuttaminen korostuu, sillä sitä kyetään käyttämään kaikkia osajärjestelmiä vastaan. Kineettinen vaikuttaminen vaatii osajärjestelmän havaitsemisen, kantamalla olevan aseensa sekä osuman tai useita osumia osajärjestelmään. Samalla saatetaan vaurioittaa muita osajärjestelmiä. Tämän vaikuttamiskeinon etuna on myös olemassa olevien järjestelmien käytön mahdollisuus lennokkijärjestelmää vastaan. Haasteeksi voi muodostua kohteeseen osuminen, sillä lennokit ovat pienempiä kuin ilmatorjunnan yleiset maalit, helikopterit ja lentokoneet. Maan pinnalla olevia osajärjestelmiä vastaan voidaan toimia samoilla menetelmillä kuin muita maalla sijaitsevia kohteita vastaan, mm. suora-ammunnalla ja epäsuoralla tulella.

Toinen esiin nouseva piirre on vaikuttaminen lennokkijärjestelmän sensoreita, hyötykuormaa ja datalinkkiä vastaan elektromagneettisin keinoin. Lennokin toiminnan kannalta olennaisten toimintojen häiritseminen, vaurioittaminen tai tuhoaminen on tietyissä rajoitteissa mahdollista sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvilla järjestelmillä [23, s.39-47]. Käyttämällä sopivaa keinoa, voidaan lennokin ohjaussignaali kaapata ja käskä lennokit laskeutumaan tai pakottaa se toimimaan automaattisessa tilassa. Datalinkkiä häiritsemällä voidaan estää lennokkia välittämästä sensoridataa maa-asemalle, jolloin se ei tuota lisäarvoa. Sensoreita voidaan sokaista joko väliaikaisesti kohteen läheisyydessä tai pysyvästi vaurioittamalla sitä tarpeeksi suurella lähetteellä [23, s.44-47]. Samaa keinoa voidaan käyttää myös tiedonsiirtokanavien vaurioittamiseen. Erityisen huomionarvoista on, että tietyillä elektromagneettisen spektrin aseilla on mahdollista saavuttaa sama vaikutuspotentiaali kuin kineettisen vaikutuksen ilmatorjunta-aseilla. Elektromagneettisen vaikuttamisen etuna on käytön halpuus, vaikuttavana osana toimii sähkömagneettinen säteily, jota kyetään tuottamaan sähköllä. Osa järjestelmistä on kuitenkin vasta kokeiluvaiheessa, jolloin ne ovat kalliita. Teknologian kehittyessä on mahdollista, että niiden hinta tulee putoamaan, jopa merkittävästi. Riippuen vaikuttamiskeinosta, voidaan yhdellä torjuntajärjestelmällä mahdollisesti vaikuttaa useita lennokkeja vastaan samanaikaisesti tai nopealla syklillä.

Kuvassa 2 eri vaikuttamiskeinoja on jaettu vaikuttamiskeinon ja vaikutettavan osajärjestelmän mukaan. Kuvassa on esitetty vain ilmatorjuntaan soveltuvien järjestelmien tehokkuutta.

	Vaikuttamiskeino	Osajärjestelmä							
		Lennokki (lavetti)	Hyötykuorma	Datalinkki	Navigointi	Laukaisu	Laskeutumis	Maa-asema	Tuki
Kineettinen vaikuttaminen	Ammusilmatorjunta								
	Ohjusilmatorjunta								
Sähkömagneettinen vaikuttaminen	Matalan tehon sähkömagneettinen spektri								
	Korkeateholaser								
	Korkeatehoinen mikroaaltose								
	Vaikutus	Selite			Vaikutus mahdollinen, riippuen järjestelmän rakenteesta				
	Häirintä	Tominta estynyt vaikutuksen ajan							
	Tuhoaminen	Osajärjestelmää ei kyetä korjaamaan							

Kuva 2. Eri vaikuttamiskeinojen vaikutuspotentiaali lennokin osajärjestelmiä vastaan.

Tarkasteltaessa eri vaikuttamismahdollisuuksia huomataan, että ilmatorjuntajärjestelmillä laskeutumisjärjestelmiin sekä maa-asemaan ja tukijärjestelmään kyetään vaikuttamaan rajoitetuin menetelmin. Laukaisujärjestelmiin ei kyetä vaikuttamaan lainkaan. Epäsuoralla tulella näihin kyetään vaikuttamaan, mikä on edullista varsinkin ennen kuin lennokka laukaistaan tehtävälle. Tämä vaatii kuitenkin järjestelmän paikantamista ennen tehtävän suoritusta, mikä voi olla haasteellista, sillä järjestelmä ei todennäköisesti anna itsestään erityistä herätettä ennen tehtävään toimeenpanoa. Sähkömagneettisin keinoin maa-asemaa kyetään häiritsemään, mutta olettaen että maa-asema on kauempana kuin lennokka, on säteilytehon puolesta tehokkaampaa häiritä lennokin järjestelmiä. Korkeatehoiset suunnatun energian aseet vaativat näköyhteysreititi toimiakseen [9, s.417], joten mikroaalto- ja laseraseilla ei voida vaikuttaa maa-asemaan tai tukijärjestelmiin. Lennokin ja sen mukanaan kantamien järjestelmien tuhoaminen on mahdollista sekä kineettisin että sähkömagneettisin keinoin. Lisäksi matalampitehoisilla järjestelmillä on mahdollista häiritä lennokin osajärjestelmiä.

3. LENNOKKIEN TORJUNTA

3.1. Ilmatorjunnan periaatteet

Tämän kappaleen tarkoituksena on luoda lukijalle riittävä pohja ilmatorjunnan perusteista ja ymmärrys ilmatorjuntajärjestelmien perusrakenteesta ja käytötavasta. Ilmatorjuntajärjestelmillä suurimpia haasteita tuottavat maalien ominaisuudet, lentävät laitteet ovat ampujasta nähtynä pieniä, liikkuvat nopeasti ja ovat mahdollisesti vain vähän aikaa asejärjestelmän vaikutusalueella [2, s.14]. Tämä tarkoittaa, että maali on kyettävä ensin havaitsemaan, asejärjestelmä on kyettävä suuntaamaan maaliin tarpeeksi tarkasti ja ammutuilla laukauksilla on saatava vaikutus kohteeseen. Ilmatorjunta-asejärjestelmät voidaan luokitella niiden ampumaetäisyyden mukaan, kuten taulukossa 3 on esitetty.

Taulukko 3. Ilmatorjunta-asejärjestelmien luokittelu [2, s.15]

Luokka	Erittäin lyhyen kantaman ilmatorjunta (EKIT)	Lyhyen kantaman ilmatorjunta (LKIT)	Keskipitkän kantaman ilmatorjunta (KKIT)	Pitkän kantaman ilmatorjunta (PKIT)
Etäisyys	<5km	5-10km	10-50km	>50km
Korkeus	<3km	3-5km	5-20km	>20km

Ilmatorjunta-asejärjestelmät koostuvat johtamisjärjestelmistä, ohjusasejärjestelmistä sekä ammusasejärjestelmistä [24, s.264]. Johtamisjärjestelmän kerätään eri sensorein ja aistein vihollisesta saatu tieto. Tätä tietoa käytetään maalinosoitukseen eri asejärjestelmille [24, s.264]. Asejärjestelmät on jaoteltu käytetyn ampumatarvikkeen mukaan ammus- ja ohjusilmatorjuntajärjestelmiin. Ammusilmatorjunnan aseet ovat tehokkaan ampumaetäisyytensä puolesta joko erittäin lyhyen tai lyhyen kantaman ilmatorjuntajärjestelmiä [2, s.15-16]. Ohjusasejärjestelmät voivat puolestaan olla kantamansa puolesta olla mitä vain erittäin lyhyen ja pitkän kantaman välillä, riippuen käytetystä ohjuksesta. Tässä tutkimuksessa molempia asejärjestelmiä käsitellään kineettisen vaikuttamisen järjestelminä, sillä niiden kohteessa aiheuttama vaikutus perustuu kineettiseen energiaan, joko suoran osuman, räjähdysvaikutuksen tai sirpaleiden kautta. Suunnatun energian aseilla on myös kyky vaikuttaa ilmamaaleihin. Tässä tutkimuksessa niistä käytetään termiä sähkömagneettisen vaikutuksen järjestelmät, sillä niiden toiminta perustuu sähkömagneettiseen säteilyyn.

Ilma-ammunta voidaan kolmeen vaiheeseen: ennen tulitoimintaa tapahtuvaan toimintaan, tulitoimintaan ja tulituksen jälkeisiin toimiin. Ennen tulitoimintaa tapahtuvat toimet sisältävät maalin paikannuksen, ammunnan valmistelun, maalinosoituksen ja maalin tunnistuksen. Paikantaminen tarkoittaa maalin suunnan ja koordinaattien selvittämisen, jotta tulenkäytön johtaminen olisi mahdollista. Ammunnan valmistelulla tarkoitetaan asejärjestelmän saattamista ampuma-valmiiksi, sekä kaikkia niitä toimenpiteitä joilla ammuntaan vaikuttavat virheet saadaan minimoitua ennen tulitoimintaa. Näihin toimiin sisältyy varautuminen varamenetelmien käyttöön sekä varautuminen erilaisiin tilanteisiin. Maalinosoitus tarkoittaa nimensä mukaisesti maalin osoittamista aseelle. Tämä voidaan toteuttaa joko asean oman henkilöstön toimesta aisti- tai sensoritähystyksellä tai johtamisjärjestelmän kautta. Maalinosoituksessa on merkittävä ero sillä, voidaanko maali osoittaa kahdessa vai kolmessa ulottuvuudessa. Maalin tunnistus tarkoittaa vaikutettavan kohteen tunnistamista, ennen kaikkea sitä, ettei kyseessä ole oma lentoalus. [2, s.32]

Tulitoiminta sisältää seuraavat vaiheet: maalin sieppaus, maalin paikan ja liiketilan mittaaminen, ennakonlaskenta, ampuma-arvojen määrittämisen, ampumakäskyt, laukaisun sekä ohjuksien tapauksessa tarvittavien tietojen päivittämisen ohjuksen lennon aikana. Maalin sieppaus tarkoittaa sitä, että ampuja tai asejärjestelmä alkaa seurata sille osoitettua tai havaittua maalia. Maalin paikan ja liiketilan mittaaminen sisältää näiden arvojen mittauksen jälkeisen syöttämisen ennakkolaskimelle tai ampujan tekemää arviota siitä, kannattaako maalia ampua. Ennakonlaskenta on ammusaseilla ammunnan tärkein vaihe, tarkoittaen kuinka paljon maalin eteen aseella tulee ampua, jotta osuma saadaan aikaseksi. Ampuma-arvojen määrittäminen liittyy osittain ennakonlaskentaan, jossa lasketaan mm. miten ammuksen lentoaika ja putoaminen vaikuttaa maaliin osumiseen etäisyyden myötä. Ampumakäskyt liittyvät lähinnä taistelutekniikkaan, siihen miten, kuinka monella ja miltä etäisyydeltä maaliin vaikutetaan. Laukaisu on terminä varsin itseselitteinen ja käsittää asejärjestelmän käytön. [2, s.33]

Tulituksen jälkeiset toimet sisältävät ammunnan tuloksen selvittämisen, tulen korjaamisen sekä maalinvaihdon. Ammunnan tulos tarkoittaa ammunnan vaikutuksen selvittämistä. Tämä voidaan tehdä ampujan havainnoin, optiikan tukemana tai tutkalla. Ammunta voidaan todeta onnistuneeksi, mikäli maalia saatiin vaurioitettua tai se saatiin tuhottua. Ammunnan tuloksen perusteella tehdään päätös jatkotoimenpiteistä, joita ovat seuraavat. Tulen korjaaminen tarkoittaa saman maalin ampumista, mutta korjattuna edellisen ammunnan havaintojen perusteella. Maalin vaihtaminen tarkoittaa tulitetun maalin vaihtamista seuraavaan maaliin. Maalia voidaan vaihtaa mikäli edellistä maalia saatiin vaurioitettua riittävästi tai se saatiin tuhottua. Perusteena voi olla myös maalin siirtyminen pois tulialueelta tai uuden vaarallisemman maalin ilmaantuminen tulenkäyttöalueelle. [2, s. 34]

Kaikki toimet ennen tulitoimintaa ja tulitoiminnan aikana voivat muodostaa virheitä ammuntaan. Mikäli maalia ei saada paikannettua, ei siihen luonnollisesti kyetä vaikuttamaan. Ammunnan valmistelu puolestaan sisältää kaluston valmistelun, ballistisen valmistelun sekä topografisen valmistelun.

3.2. Kineettinen vaikuttaminen

3.2.1. Ammusilmatorjunta

Ilmatorjunta-asejärjestelmille on ominaista, että ne sisältävät aina kyvyn etsiä ja ilmaista maalin, tunnistaa maalin havainnon jälkeen, seurata maalia sekä ammusaseilla määrittää näin saatujen tietojen perusteella ennako sekä oikea-aikainen tulitushetki [24, s.265]. Nämä arvot voidaan määrittää joko arviosuureina tai jonkin mittalaitteen, esimerkiksi tutkan tai laseretäisyysmittarin avulla. Mikäli käytetään arviosuureita, eli ampuja tai suuntaaja arvioi maalin nopeuden suunnan, etäisyyden jne., ei tietenkään päästä niin suureen tarkkuuteen kuin kehittyneellä tutka- ja mittaustekniikalla. Suurempikaliiperisia, lähtökohtaisesti kalliimpia ja tehokkaampia, asejärjestelmiä käytettäessä on siis luontevampaa tarjota niille myös tarkempaa maalitietoa. Suurempi kaliiperi tarkoittaa myös lähes aina suurempaa kantamaa, joten kauempana olevan maalin tarkempi paikantaminen on myös tarpeellista. Parhailta tykeillä päästäänkin alle 1° (piirun) tarkkuuteen ennakonlaskennassa [2, s.14]. Tutkimuksessa ei tarkemmin paneuduta maalitiedon hankintaan.

Ammusilmatorjuntaa tarkastellaan tässä kappaleessa kahden esimerkin kautta. Ensimmäisenä pienikaliiperista, alle 30mm:n, tykkikalustoa ilman maalinosoitusta. Toinen esimerkki on modernimpi yli 30mm tykki, jolla on tarkka maalitieto sekä kehittyneet ampumatarvikkeet. Tämä rajanveto on tarpeellinen, sillä pienempikaliiperinen alle 30mm:n ilmatorjuntatykistö pyrkii lähtökohtaisesti suora-ammunta osumaan, koska niiden ammusten vaikutusmekanismi perustuu joko laukauksen suoraan kineettiseen energiaan tai räjähdysvaikutukseen [25, s.2]. Vastavuo- roisesti yli 30mm:n ampumatarvikkeilla on mahdollista käyttää erilaisia sytyttimiä, jotka rä- jäyttävät kranaatin maalin läheisyydessä, joko maalin aiheuttaman herätteen vaikutuksesta tai laukaustapahtuman yhteydessä ohjelmoidun aikahidasteen puolesta [25, s.2-3]. Tämänkalta- sella sytyttimellä varustetun ampumatarvikkeen ei tarvitse osua suoraan kohteeseen aiheuttaak- seen siihen vaikutusta, sillä kranaatti räjähtää riittävän lähellä maalia tuottaakseen halutun lop- putuloksen, kasvattaen maalin näennäistä kokoa merkittävästi, sillä lähiosumakin riittää halu- tun lopputuloksen saavuttamiseen [25, s.7-8].

Ensimmäisenä tarkasteltava järjestelmä on suomalaisillekin tuttu ZU-23-2, paikallisesti lempi- nimeltään ”Sergei”. ZU-23-2 on Neuvostoliitossa 50-luvulla kehitetty ammusilmatorjunta-ase, joka koostuu kahdesta rinnan sijoitetusta 23mm:n tykistä, sekä pyörillä kulkevasta jalustasta. Asemaan ajettaessa pyörät käännetään sivuun ja ase laskeutuu kolmen säädettävän tukivarren varaan. Aseen miehistö on yleensä viisihenkinen, joista kaksi istuu tulitoiminnan aikana ase- seen integroiduilla penkeillä. Kummallekin tykille on oma 50 laukauksen ammuskannu. [26]

ZU-23-2:n molempien tykkien tulinopeus on noin 800-1000 laukausta minuutissa, käytännön tulinopeuden ollessa 200 laukausta minuutissa. Käytettävissä on kahta eri ammustyyppiä, API-T (Armor Piercing Incendiary - Tracer, Panssarin läpäisevä ammus valojuovalla ja sytytysvai- kutuskella) sekä HEI-T (High Explosive Incendiary - Tracer, Sirpalesytytyskranaatti valo- juovalla). API-T:n lähtönopeus putken suusta on 970m/s se kykenee läpäisemään 25mm pans- saria 500m ampumaetäisyydeltä vaakasuoralla iskukulmalla. HEI-T ammuksen lähtönopeus on vastaavasti 970m/s, joten molemmilla ammuksilla on verrattain sama lentorata. [26]

Ase käyttää optista/mekaanista tähtäysjärjestelmää, jolloin käytettävät arvot ovat arviosuureita. Asetta on eri maissa päivitetty tähtäimien ja ammunnanhallinnan osilta. Perusmuotoisilla täh- täimillä asejärjestelmä kykenee vaikuttamaan maaleihin, joiden lentonopeus on alle 50m/s. [26]

Asejärjestelmä on tarkoituksella epätarkka. Hajonta on noin 6 piirua sivusuunnassa ja noin 12 piirua korkeussuunnassa. Suurella hajonnalla pyritään kompensoimaan systemaattisia virheitä sekä suuntauksessa tehtyjä virheitä. Jotta hajonnan kasvu ei aiheuttaisi liikaa virhettä, on aseella pyrittävä ampumaan pitkiä sarjoja. Pieniin yksittäisiin maaleihin ei ole tarkoituksenmukaista tästä syystä ampua yksittäisillä aseilla, vaan jaoksittain. [24, s. 270-272]

Toinen tarkasteltava asejärjestelmä on Oerlikonin kehittämä Skyshield järjestelmä. Skyshield kehitettiin 90-luvun loppupuolella lyhyen kantaman ilmatorjuntajärjestelmäksi vastaamaan lennokkien, helikopterien, maataistelukoneiden sekä matalan uhkatason ilmasta laukaistujen aseiden muodostamaa uhkaa vastaan. [27]

Järjestelmä koostuu yleensä tulenjohtoasemasta, maalinosoitusasemasta sekä erillisistä 35mm revolverikanuunoista. Kanuunat ampuvat 35mm:n AHEAD (Advanced Hit Efficiency And Destruction) ammuksia. Järjestelmään on myös mahdollista liittää erittäin lyhyen kantaman ilmatorjuntaohjuksia. Järjestelmästä on olemassa myös C-RAM (Counter Rocket and Mortar) versio, joka on optimoitu pienempien uhkien, kuten ohjusten ja kranaattien torjuntaan ennen kuin ne osuvat maaliinsa. [27]

Järjestelmä on pitkälti automatisoitu ja modulaarinen. Asejärjestelmänä toimii Rheinmetallin 35/1000 kaasutoiminen revolverikanuuna. Jokaisella aseella on käytössään 228 ammusta. Aseen tulinopeus on 1000 laukausta minuutissa. AHEAD ammusten lisäksi sillä voidaan ampua kaikkia muita Rheinmetallin 35mm standardin mukaisia ammuksia. Pääsääntöinen tulenkäyttötapa on ampua 24 laukauksen purske laskettuun ennakkopisteeseen. Jokainen kranaatti sisältää 152 esisirpaloitua volframisylinteriä, jotka ovat pyörimisvakavoituja. [27]

Jokainen ase sisältää 252 laukausta, eli siis tarpeeksi ampumatarvikkeita noin 10:n kohteen torjuntaan. Kaikki aseet on varustettu akuilla sekä generaattoreilla pitkäkestoista toimintaa varten. Järjestelmään kuuluu myös automaattinen kallistuksenkompensointijärjestelmä. Asejärjestelmä voidaan nostaa tai integroida ajoneuvoon liikkuvuuden lisäämiseksi. [27]

Tulenjohtojärjestelmä koostuu miehittämättömästä sensoriyksiköstä sekä komentoyksiköstä. Komentoyksikkö on kahden henkilön miehittämä, joista toisen tehtävänä on maalien seuranta ja toisen tulenkäyttö. Sensoriyksikkö sisältää etsintätutkan sekä seurantatutkan. Järjestelmä mahdollistaa automaattisen maalinhälytyksen, uhkan arvioinnin sekä siirron maalinseurantasensoreille. Maalinseurantasensorit koostuvat tv- ja infrapunakameroista sekä laseretäisyysmittarista, jotka yhdistävät tarkennetun maalidatan tutkan tuottamaan, saaden aikaan yksityiskohtaisen kuvauksen maalin sijainnista, nopeudesta ja suunnasta. [27]

AHEAD-ammukset kehitettiin Oerlikonin (nykyisin osa Rheinmetallia) toimesta lähtökohtaisesti risteilyohjusten torjuntaan. Ammukset havaittiin myös varsin tehokkaiksi muita ilmamaaleja vastaan. Ammus koostuu viidestä pääosasta: ohjelmointikäämistä, sytyttimestä, ulosheittopanoksesta, raskasmetallisirpaleista sekä kuoresta. Ammus ohjelmoidaan putkivaiheen aikana lähtönopeuden ja maalin etäisyyden perusteella. Ulosheittopanos on verrattain pieni, noin gramman painoinen, ja sen tehtävänä on vain rikkoa ammuksen kuori ja levittää valmiit sirpaleet ympäristöönsä. Täten sillä ei juuri ole räjähdysvaikutusta, vaan vauriomekanismi perustuu sirpaleiden kineettiseen energiaan, sekä ammuttavan kohteen omaan liike-energiaan. Jokainen sirpale on 3,3 grammaa panoltaan ja valmistettu volframista. Sytyttimen toimiessa ja ulosheittopanosen räjähtäessä sirpaleet levittäytyvät kranaatin eteen (eng. ahead) noin 10° asteen kulmassa. Jokainen ammus voidaan ohjelmoida räjähtämään eri etäisyydellä. Ammuksien ohjelmoiduksi räjähtämisetäisyydeksi kohteesta voidaan valita 10-40m. Muodostuvan sirpalepilven pinta-ala ja sirpaleitiheys on esitetty taulukossa 4. [28, 3s.84]

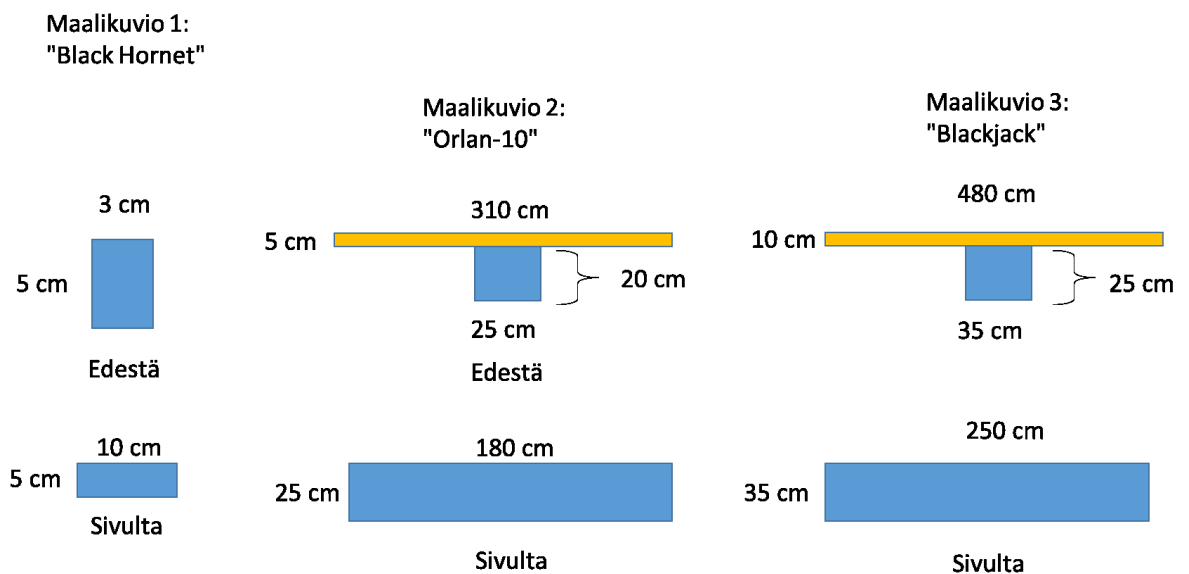
Taulukko 4. AHEAD-ammusten sirpaleviuhkojen leveys, pinta-ala ja tiheys eri räjäytysetäisyyksillä.

Räjähdysetäisyys	10m	20m	30m	40m
Viuhkan leveys metreinä maalin kohdalla (10° hajonnalla)	1,75	3,50	5,25	7,00
Sirpaleviuhkan pinta-ala maalin kohdalla (m^2)	2,41	9,62	21,65	38,48
Sirpaleita (152) / m^2	63,07	15,80	7,02	3,95

3.2.1.1. Maaliin vaikuttaminen

Jotta ammusilmatorjunta-aseilla päästäisiin vaikutukseen, on niitä tietenkin käytettävä. Toisin kuin ihmisten ohjaamia järjestelmiä vastaan, voidaan pelotevaikutuksen olettaa olevan lennokkeja vastaan pienempi, sillä järjestelmän käyttäjällä ei ole kuolemanpelkoa. Tästä syystä kapaleessa käsitellään lähinnä lennokin vaurioittamista ja tuhoamista.

Tarkastellaan näiden kahden tykin tulen tehokkuutta kolmea erikokoista pientä lennokkia vastaan optimitilanteessa. Oletetaan että kaikki ammuntaa edeltävät toimet on toteutettu virheettömästi, eikä systemaattista virhettä esiinny. Oletetaan myös lennokin olevan leijunnassa, tai hitaassa kohtisuorassa liikkeessä tykkiä vasten kohtisuoraan. Tykin saama maalitieto on oikeaa, suuntaus onnistuu ja tarkka ampumaetäisyys on tiedossa. Iskemäkeskeispisteen oletetaan olevan maalin keskellä. Tällöin jäljelle jää ainoana virhelähteenä aseensa oma hajonta. Tämänkaltaisen tilanteen ei ole realismia, mutta kuvaa aseensa absoluuttista suorituskkyä optimitilanteessa, toisin sanoen sen suorituskkyyn ylärajaa. Kuvassa 3 on esitetty käytettävät kolme maalikuviota jotka on muodostettu ensimmäisessä pääluvussa käsiteltyjen lennokkien pohjalta.



Kuva 3. Käytetyt maalikuviot.

Ammusaseiden osumatodennäköisyyttä arvioitiin seuraavalla tavalla. Aseiden hajonnat selvitettiin leveys ja korkeussuunnassa. Tämän jälkeen niiden metrimääräiset hajonnat eri ampumaetäisyyksille laskettiin. Näiden hajontojen oletettiin noudattavan normaalijakaumaa. Tämän jälkeen saadut arvot normitettiin, jolloin ne noudattavat normitetun normaalijakauman kertymäfunktia. Maalin leveys- ja korkeuskohtien puoliväli määritettiin iskemäkeskeispisteeksi. Laskeamalla todennäköisyydet laukauksen osumiselle maalikuvion sekä leveys- että korkeussuunnassa ja kertomalla nämä todennäköisyydet keskenään, saatiin yksittäisen laukauksen osumatodennäköisyys selvitettyä. Edestäpäin ammuttaessa maalin ”runkoa” ja ”siipiä” käsiteltiin omina kokonaisuuksinaan, joita vastaan määritettiin osumatodennäköisyydet erikseen. Laskeamalla nämä todennäköisyydet yhteen, saatiin selville kaikki maalikuvioon osuneet laukaukset.

Ammusilmatorjunta-aseet ampuvat useita laukauksia yhdessä tulitehtävässä. Usein yksikin osuma riittää aiheuttamaan riittävästi vahinkoa. Laskettaessa varmuutta, että tietty tapahtuma tapahtuu ainakin yhden kerran, voidaan sitä arvioida seuraavasti.

$$n = \frac{\ln(1 - P)}{\ln(1 - p)}$$

jossa n ilmaisee todennäköisyyden ainakin yhdelle onnistuneelle laukaukselle, P on haluttu varmuus ja p on yhden laukauksen osumistodennäköisyys. [39, s.175]

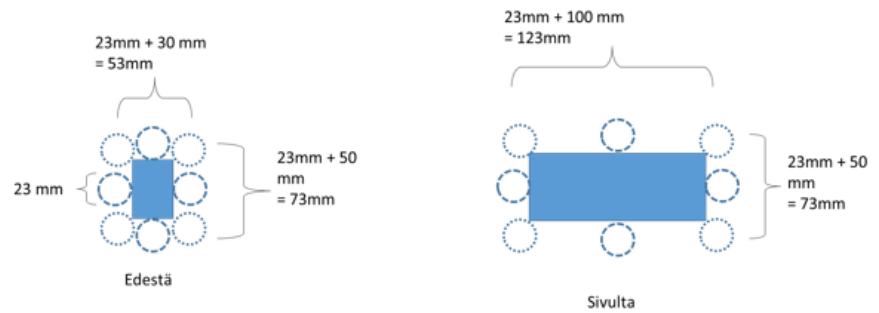
Ilmatorjuntatykkien hajonta ei todellisuudessa noudata normaalijakaumaa, sillä tykkien nopean toiminnan takia laukaukset eivät ole toisistaan riippumattomia, eikä vastakkaisten laitojen perättäisiä laukauksia esiinny aseella ammuttaessa, koska tykki ei ehdi heilahtaa ääriasennosta toiseen ennen seuraavan laukauksen ampumista [2, s.94].

Käyttäen edellä esitettyä voidaan laskea todennäköisyydet sille, että yksittäinen laukaus on sivuttais- ja korkeushajontansa puolesta maalikuvion sisällä. ZU-23-2:n sivusuuntainen keskihajonta on 6 piirua ja korkeussuunnassa 12 piirua [24, s.270-272]. Hajonnan aiheuttama metriääräinen hajonta on taulukossa 5.

Taulukko 5. ZU-23-2:n sivu- ja korkeushajonnat eri ampumaetäisyyksille

Ampumaetäisyys (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000
Sivuhajonta 6' (m)	1,8	3	6	9	12	15	18
Korkeushajonta 12' (m)	3,6	6	12	18	24	30	36

Ammuttaessa ensimmäistä maalikuviota, on tehtävä muutamia lisäoletuksia. Maali on kooltaan hyvin pieni, tykin kaliiperin kokoluokkaa. Pienuudestaan ja kevyestä rakenteestaan johtuen sen voidaan myös olettaa vaurioituvan hipaisevastakin osumasta. Käytetty kaava laskee pistearvoja, joten myös ne tilanteet jossa laukaus hipaisee maalia, on otettava huomioon. Täten maalin yksi osalta käytetään kuvassa 4 esitettyjä arvoja. Tämäkään ei kuvaa täysin todellisuutta, sillä kulmia hipovat laukaukset eivät muodosta täydellistä suorakulmiota.



Kuva 4. Maali 1 ammuttaessa ZU-23-2:lla

Laskemalla saadaan seuraava taulukko 6.

Taulukko 6. Osumatodennäköisyys ZU-23-2:lla maalikuvioon 1 edestä etäisyyden funktiona.

Ampumaetäisyys (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000
Osumatodennäköisyys yhdellä laukauksella	9,50E-05	3,42E-05	8,55E-06	3,80E-06	2,14E-06	1,37E-06	9,50E-07
Osumatodennäköisyys 100:lla laukauksella (vähintään 1 osuma)	0,00946	0,00342	0,00085	0,00038	0,00021	0,000137	9,50E-05
Osumatodennäköisyys 1000:lla laukauksella (vähintään 1 osuma)	0,090650493	0,033630874	0,008515896	0,003793837	0,002135808	0,001367443	0,000949812
Vaadittu laukausmäärä jotta saavutetaan 50% osumatodennäköisyys vähintään yhdellä laukauksella	7295	20262	81048	182357	324190	506547	729427

Ammuttaessa maalikuviota 1 sivultapäin ei tilanne juuri muutu, kuten taulukosta 7 ilmenee.

Taulukko 7. Osumatodennäköisyys ZU-23-2:lla maalikuvioon 1 sivulta etäisyyden funktiona.

Ampumaetäisyys (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000
Osumatodennäköisyys yhdellä laukauksella	0,000220486	7,93857E-05	1,98476E-05	8,82124E-06	4,96196E-06	3,17566E-06	2,20532E-06
Osumatodennäköisyys 100:lla laukauksella (vähintään 1 osuma)	0,021809692	0,007907459	0,001982808	0,000881738	0,000496074	0,000317516	0,000220508
Osumatodennäköisyys 1000:lla laukauksella (vähintään 1 osuma)	0,197890692	0,076319357	0,019652096	0,008782481	0,004949685	0,00317063	0,002202895
Vaadittu laukausmäärä jotta saavutetaan 50% osumatodennäköisyys vähintään yhdellä laukauksella	3144	8732	34924	78577	139692	218269	314307

ZU-23-2:en osumatodennäköisyys näin pientä maalia vastaan on lähes olematon. Edes yhden osuman saavuttaminen pienelle 300m:n ampumaetäisyydelle vaatii optimitilanteessakin tuhansia laukauksia.

Ammuttaessa maalikuviota 2 ”Orlan-10” ZU-23-2:lla edestä- ja sivultapäin saavutetaan seuraavat osumatodennäköisyydet, jotka on esitetty taulukoissa 8 ja 9.

Taulukko 8. Osumatodennäköisyys ZU-23-2:lla ammuttaessa maalikuviota 2 edestä

Ampumaetäisyys (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000
Osumatodennäköisyys yhdellä laukauksella	0,00461	0,00175	0,00045	0,00020	0,00011	7,24E-05	5,03E-05
Osumatodennäköisyys 100:lla laukauksella (vähintään 1 osuma)	0,37002	0,16098	0,04395	0,01987	0,01124	0,00722	0,00502
Osumatodennäköisyys 1000:lla laukauksella (vähintään 1 osuma)	0,99015	0,82713	0,36202	0,18182	0,10690	0,06985	0,04906
Vaadittu laukausmäärä jotta saavutetaan 50% osumatodennäköisyys vähintään yhdellä laukauksella	151	395	1543	3455	6132	9573	13780

Taulukko 9. Osumatodennäköisyys ZU-23-2:lla ammuttaessa maalikuviota 2 sivulta

Ampumaetäisyys (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000
Osumatodennäköisyys yhdellä laukauksella	0,01061	0,00392	0,00099	0,00044	0,00025	0,00016	0,00011
Osumatodennäköisyys 100:lla laukauksella (vähintään 1 osuma)	0,65573	0,32480	0,09439	0,04319	0,02454	0,01578	0,01099
Osumatodennäköisyys 1000:lla laukauksella (vähintään 1 osuma)	0,99997	0,98031	0,62897	0,35690	0,22001	0,14706	0,10460
Vaadittu laukausmäärä jotta saavutetaan 50% osumatodennäköisyys vähintään yhdellä laukauksella	66	177	700	1571	2790	4358	6274

Maalikuviota 2 vastaan ZU-23-2:n tulitoiminta on lyhyille ampumaetäisyyksille mielekäästä. Yhden tykin ampumatarviketäyttö on 100 laukausta kahdessa 50 laukauksen ammuskannussa. Yksittäisen tykin ampumatarvikkein saavutetaan yli 50% osumatodennäköisyys sivulta ammuttaessa 300m etäisyydelle. Kolmen tykin jaoksella saavutetaan todennäköisesti vaikutusta edestä 300m ja sivulta 500m saakka. Yhdeksän tykin patterilla edestä tehokas ampumaetäisyys on edestä 500m ja sivulta 1000m. Tätä kauemmat ampumaetäisyydet ovat kuitenkin ampumatarvikkeiden kulutukseltaan jälleen huomattavan suuria.

Viimeinen tarkasteltava maalikuvio on 3 ”Blackjack”. Laskemalla saadaan tauluko 10 ja 11.

Taulukko 10. Osumatodennäköisyys ZU-23-2:lla ammuttaessa maalikuviota 3 edestä

Ampumaetäisyys (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000
Osumatodennäköisyys yhdellä laukauksella	0,0111994 87	0,0046040 42	0,0012267 31	0,0005519 85	0,0003118 49	0,0001999 88	0,0001390 34
Osumatodennäköisyys 100:lla laukauksella (vähintään 1 osuma)	0,6757587 3	0,3696419 47	0,1155138 23	0,0537171 68	0,0307083 78	0,0198021 23	0,0138081 33
Osumatodennäköisyys 1000:lla laukauksella (vähintään 1 osuma)	0,9999871 57	0,9900945 76	0,7069710 69	0,4242822 63	0,2679435 2	0,1812759 02	0,1298098 39
Vaadittu laukausmäärä jotta saavutetaan 50% osumistodennäköisyys vähintään yhdellä lau- kauksella	62	151	565	1256	2223	3466	4986

Taulukko 11. Osumatodennäköisyys ZU-23-2:lla ammuttaessa maalikuviota 3 sivulta

Ampumaetäisyys (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000
Osumatodennäköisyys yhdellä laukauksella	0,0198737 68	0,0075174 81	0,0019202 06	0,0008568 64	0,0004826 66	0,0003091 08	0,0002147 35
Osumatodennäköisyys 100:lla laukauksella (vähintään 1 osuma)	0,8656612 52	0,5297956 97	0,1748624 46	0,0821516 74	0,0471314 2	0,0304426 16	0,0212468 27
Osumatodennäköisyys 1000:lla laukauksella (vähintään 1 osuma)	0,9999999 98	0,9994717 18	0,8536935 3	0,5756646 6	0,3829362 05	0,2659338 77	0,1932632 72
Vaadittu laukausmäärä jotta saavutetaan 50% osumistodennäköisyys vähintään yhdellä lau- kauksella	35	92	361	809	1436	2243	3228

Maalikuvion 3 ollessa kooltaan suurin, on itsestään selvää, että sitä vastaan voidaan toimia muita tehokkaammin. Yksittäisen tykin tehokas vaikutusetäisyys on edestä 300m ja sivulta 500m. Jaoksen tehokas vaikutusetäisyys on edestä 500m ja sivulta vähän alle 1000m. Patterin tehokas vaikutusetäisyys edestä on 1000m ja sivulta 1500m.

Kokonaisuutena tarkasteltaessa voidaan todeta että ZU-23-2 tykkikalustolla on valittuja maalikuvioita vastaan pyrittävä vaikuttamaan vain verrattain lyhyille ampumaetäisyyksille, sekä useilla tykeillä samanaikaisesti. Maalikuviota 1 vastaan tuli on täysin tehotonta. Maalikuviota 2 vastaan voidaan toimia jaoksittain kerralla käytössä olevan ampumatarvikemäärän rajoissa 500 metriin saakka, sekä 1000 metriin koko patterin tulella mikäli maalia ei jouduta ampumaan suoraan edestäpäin. Maalikuviota 3 vastaan tuli voi olla tehokasta koko patterin tulella jopa 1500m saakka.

Skyshield-järjestelmän tarkkoja tietoja ei ole saatavilla, joten seuraavissa laskuissa käytetään arvioituja arvoja. Laskuissa käytetty tykin hajonta sivusuunnassa on 0,8 piirua ja korkeussuunnassa 2 piirua. Tämä arvo on muodostettu kahden eri lähteen vastaavalle Oerlikonin 35mm:n tykille ilmoittaman arvon keskiarvona [2; 29]. Koska järjestelmän käyttämien AHEAD-ammusten vaikutus ei perustu suora-ammuntaosumaan (toisin sanoen iskusytyttimen toimintaan), on sen vaikutusta arvioitu seuraavan menetelmän kautta. On huomion arvoista, että käytetty menetelmä ei täysin oikein kuvaa järjestelmän toimintaa, mutta antaa riittävän hyvän perustan sen tehokkuuden arvioinnille.

Ensimmäisenä AHEAD-kranaatin aiheuttaman sirpaleviuhkan pinta-ala on laskettu räjäytysetaisyyden sekä viuhkan avautumiskulman perusteella. Laskutoimitusten helpottamiseksi näin muodostunut ympyrän muotoinen sirpaleviuhka on muutettu neliöksi, jolla on sama pinta-ala ympyrän kanssa. Seuraavaksi on laskettu tykin kranaattien jakaumat samoin kuin ZU-23-2:n kanssa. Näin saatua kranaattien todennäköisyysjakamaa on käytetty aikaisemmin mainitun neliön keskipisteen määrittämiseen. Mikäli tämä neliömuotoinen sirpalepilvi peitti maalielementin kokonaan tai niin suuren pinta-alan kuin se pystyi, kutsuttiin tilannetta ”täyspeitoksi”. Mikäli elementti peittyi vain osittain, oli kyseessä ”osittainen peitto”. Mikäli muodostunut neliö ei peittänyt maalielementtiä ollenkaan, saatiin ”ohilaukaus”.

Ensimmäisenä tulokset laskettiin molempien maalielementtien, ”siipien” ja ”rungon” osalta. Mikäli nämä tulokset olisi laskettu yhteen, olisivat tulokset olleet virheellisiä, sillä osa niistä laukauksista jotka olivat ”rungon” osalta ”täyspeittoja”, olivat sitä myös ”siipien” osalta. Tästä syystä laskettiin nämä tapaukset erikseen. Vähentämällä kaikista maalielementtiin kohdistuneista ”täyspeitoista” ne, jotka olivat yhteisiä toisen maalielementin kanssa, saatiin selvitettyä ne tilanteet, joissa vain kyseinen maalielementti peittyi täysin. Tästä saatiin laskettua jakauma näille tehokkaimmille laukauksille eri maalielementtien välillä.

Tämän jälkeen laskettiin ne tilanteet joissa mikään maalielementti ei peittynyt edes osittain. Vähentämällä nämä sekä ”vain siipiin”, ”vain runkoon” ja ”molempiin” kohdistuvat ”täyspeitot” sadasta prosentista, jäivät jäljelle ne laukaukset jotka peittävät jonkin maalielementin osittain, mutta eivät mitään täysin, eli ”osittaiset peitot”. Lopputuloksena saatiin selville, kuinka moni kranaatti aiheuttaa maalissa vaikutusta. Tehokkaiksi laukauksiksi laskettiin kaikki ”täyspeitot” sekä lähtökohtaisesti puolet ”osittaisista peitoista”.

Täyspeitoille laskettiin sirpaleiden odotusarvo olettamalla sirpaleiden jakautuvan tasaisesti laukauksen tehokkaan vaikutusalueen sisällä. Tämä laskettiin

$$N_{\text{sirpaleiden odotusarvo}} = \frac{A_{\text{laukauksen peittämä alue}}}{A_{\text{laukauksen tehokas alue}}} * n_{\text{sirpaleiden lukumäärä}}$$

, jolloin saatiin selville kuinka monta sirpaletta keskimäärin kohdistuu kyseiselle alueelle. Tämä toistettiin siipiin, runkoon ja molempiin kohdistuviin täyspeittoihin. Tehokkaan vaikutuksen rajana Orlan-10 ja Blackjack lennokkeja vastaan pidettiin 5 sirpaletta, joten näistä kolmesta saadusta arvosta pienintä käytettiin määrittämään, kuinka monta tehokasta laukausta maaliin täytyy saada vaikutuksen saamiseksi. Osittaiset osumat muodostavat suurimman osan tehokkaista laukauksista pitemmillä ampumaetäisyyksillä. Puolet niistä laskettiin tehokkaiksi laukauksiksi, sillä ne kuvaavat tilanteita jossa maalielementti ei juuri peity täysin sekä niitä joissa se peittyy hyvin vähän. Useamman tehokkaan laukauksen vaativaan tilanteeseen käytettiin binomijakaumaa

$$P(k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$$

, jossa $P(k)$ ilmaisee todennäköisyyden k :lle toistolle, n :n ollessa koetoistojen lukumäärä, k :n ollessa vaadittujen onnistumisten lukumäärä ja p :n ollessa yksittäisen tapahtuman onnistumisen todennäköisyys. Määrittämällä todennäköisyydet vaaditun laukausmäärän alapuolisille todennäköisyyksille ja vähentämällä ne 100%:sta saatiin todennäköisyys vähintään vaaditulle osumamäärälle. Käytetty menetelmä yliarvioi vaadittuja laukausmääriä noin 2000m saakka, mutta vain korkeintaan muutaman laukauksen verran.

Black Hornet lennokin pienen koon takia tehokkaan vaikutuksen rajan pidettiin yhtä sirpaletta ja vaikutusta arvioitiin seuraavasti. Täyspeitot ja puolet osittaisista laskettiin tehokkaiksi laukauksiksi. Näille laukauksille määritettiin vaikuttamisen todennäköisyys

$$P_{vaikutus} = \left(1 - \frac{A_{täyspeiton\ ala}}{A_{viuhkan\ ala}}\right)^{n_{sirpaleiden\ lukumäärä}}$$

joka kuvaa tehokkaan laukauksen mahdollisuutta saada edes yksi sirpaleosuma maaliin. Näin saatu todennäköisyys kerrottiin tehokkaan laukauksen todennäköisyydellä, jolloin saavutettiin vaikuttavien laukausten todennäköisyys.

Tehokkaan vaikutuksen rajaksi määritettiin viisi sirpaletta maalikuvioita 2 ja 3 vastaan. Maalikuviota 1 vastaan riitti yksi osuma. Tulokset olivat seuraavat käytettäessä 10° viuhkanleveyttä kaikille ampumaetäisyyksille ja 10m räjäytysetäisyyttä maalista.

Maalikuviota 1 vastaan saatiin taulukot 12 ja 13.

Taulukko 12. Laukausten tehokkuus Skyshield-järjestelmällä AHEAD kranaatein maalikuviota 1 vastaan edestä.

AMET (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Tehokkaan laukauksen todennäköisyys	0,802	0,532	0,201	0,098	0,057	0,037	0,026	0,019	0,014 5	0,011 2	0,001
Laukauksia vähintään yhteen sirpaleeseen 50% todennäköisyydellä	4	7	17	35	60	91	131	177	230	290	358

Taulukko 13. Laukausten tehokkuus Skyshield-järjestelmällä AHEAD kranaatein maalikuviota 1 vastaan sivulta.

AMET (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Tehokkaan laukauksen todennäköisyys	0,802	0,531	0,201	0,098	0,057	0,037	0,026	0,019	0,015	0,012	0,010
Laukauksia vähintään yhteen sirpaleeseen 50% todennäköisyydellä	2	3	7	13	23	35	50	68	88	111	137

Skyshield-järjestelmä sisältää 252 laukausta per ase, joita ammutaan lähtökohtaisesti 24 laukauksen purskeissa [27]. Yhdellä purskeella saavutetaan keskimäärin riittävä vaikutus edestä 1000m etäisyydelle sekä sivulta 2000m etäisyydelle. Yhden asean ammustäytöllä vaikutusetäisyys kasvaa edestä 4000 metriin ja sivulta 5000m metriin, jossa ammuksen itsetuho aktivoituu.

Orlan-10 lennokkia vastaan sirpaleita aiheutuu maalielementeistä pienimillään siipiin, aiheuttaen keskimäärin 3,16 sirpaletta per täyspeiton aiheuttava laukaus. Tarvittavan vaikutuksen saavuttamiseksi tarvitaan siis kaksi tehokasta laukausta. Tarvittavat laukaukset on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Laukausten tehokkuus Skyshield-järjestelmällä AHEAD kranaatein maalikuviota 2 vastaan edestä.

AMET (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Tehokkaan laukauksen todennäköisyys	0,832	0,580	0,268	0,155	0,100	0,069	0,050	0,038	0,030	0,024	0,019
Laukauksia 50% todennäköisyyteen	2	3	6	11	17	24	34	44	57	71	87

Sivulta ammuttaessa aiheutetaan keskimäärin täyspeitolla 24,5 sirpaletta, joten vaikutukseen riittää yksi tehokas laukaus. Osittaiset laukaukset, käyttäen edellä kuvattua 50% kerrointa aiheuttaisivat silti noin 12 sirpaletta keskimääräisesti, joten käytetään osittaisille osumille kerrointa 80%. Näin saatu tulos on verrannollisesti samassa suhteessa kuin Black Hornettiin vaadittavien laukausten suhde edestä ja sivulta. Tarvittavat laukaukset selviävät taulukosta 15.

Taulukko 15. Laukausten tehokkuus Skyshield-järjestelmällä AHEAD kranaatein maalikuviota 2 vastaan sivulta.

AMET (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Tehokkaan laukauksen todennäköisyys	0,750	0,529	0,274	0,160	0,102	0,069	0,050	0,037	0,029	0,023	0,019
Laukauksia 50% todennäköisyyteen	1	1	3	4	7	10	14	19	24	30	37

Yksittäinen 24 laukauksen purske riittää tuhoamaan maalin edestä 2500m ampumaetäisyydelle ja sivulta 4000m saakka. Neljä pursketta vaaditaan maalin tuhoamisen edestä äärikantamalle ja sivulta kaksi pursketta.

Blackjackia vastaan aiheutetaan täyspeitoista vähintään 5,5 sirpaletta runkoon. Täten yksi tehokas laukaus riittää vaikutuksen saavuttamiseen. Tulokset esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Laukausten tehokkuus Skyshield-järjestelmällä AHEAD kranaatein maalikuviota 3 vastaan edestä.

AMET (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Tehokkaan laukauksen todennäköisyys	0,843	0,607	0,318	0,1978	0,134	0,096	0,072	0,055	0,044	0,035	0,029
Laukauksia 50% todennäköisyyteen	1	1	2	4	5	7	10	13	16	20	24

Sivulta ammuttaessa aiheutetaan keskimäärin 34,3 sirpaletta per tehokas laukaus. Käytetään osittaisten osumien kertoimena 85%. Näin saadaan taulukon 17 tulokset.

Taulukko 17. Laukausten tehokkuus Skyshield-järjestelmällä AHEAD kranaatein maalikuviota 3 vastaan sivulta.

AMET (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Tehokkaan laukauksen todennäköisyys	0,851	0,611	0,323	0,200	0,131	0,091	0,0662	0,050	0,039	0,031	0,026
Laukauksia 50% toednnäköisyyteen	1	1	2	4	5	8	11	14	18	22	27

Yhdellä purskeella Blackjack saadan pudotettua edestäpäin ammuttaessa äärikantamalle saakka. Sivulta ammuttaessa ei aivan tähän päästä.

3.2.2. Ohjusilmatorjunta

Ohjusilmatorjuntajärjestelmät voidaan jakaa joko tehokkaan ampumaetäisyyden perusteella, tai liikuteltavuuden, lentoreitin tai ampumamenetelmien mukaan [2, s.17]. Tässä tutkielmassa ohjukset jaotellaan tehokkaan ampumaetäisyyden mukaan. Tarkasteltava järjestelmä on EKIT (erittäin lyhyen kantaman ilmatorjuntaohjus) -luokkaan kuuluva, jolloin sen tehokas ampumaetäisyys on 5km tai alle vaakatasossa.

Ohjusjärjestelmä koostuu itse ohjuslaukauksesta sekä sen tarvitsemista apujärjestelmistä, kuten valvonta-, maalinosoitus- ja tulenjohtojärjestelmästä sekä lavetista [24, s.283]. Ammunnan vaiheet ovat pitkälti samat kuin ammusilmatorjunta-aseilla. Oleellisimmat erot ammusilmatorjuntaan ovat maalin paikan määrittämisessä, maalin liiketilalla, säällä, ennakkolla sekä tulenaloitusviiveessä. [2, s. 35-38]

Ammuttaessa ammusilmatorjunta-aseella on maalin paikka määritettävä vain laukaisuhetkeen asti, sillä muutosten tekeminen ammuksen lentorataan sen jätettyä putken on mahdotonta. Ohjusaseella maalin paikka määritetään kohtaamiseen saakka. Ohjukselle päivitetään tietoa kohteen sijainnista tai se määrittää sen itse mukana kantamallaan sensorilla. Ohjus tarvitsee myös huomattavasti vähemmän tietoa laukaisutapahtuman aikana verrattuna ammusilmatorjunta-aseeseen, sillä sille voidaan syöttää tietoa laukaisun jälkeenkin. Tämä johtaa myös ohjusten pienempään tarpeeseen ennakon määrittämisessä. [2, s.35-38]

Maalin liiketilalla on huomattavasti suurempi vaikutus ammusilmatorjunta-aseen laukauksen onnistumiseen kuin ohjusaseella. Ammusilmatorjunta-aseella maalin liike laukaisutapahtuman jälkeen on ennakoitava tavalla tai toisella. Tähän sisältyy oletamus maalin jonkin asteisesta säännöllisestä toiminnasta. Ohjus puolestaan mukautuu maalin liiketilan muutoksiin. [2, s.36]

Sää vaikuttaa ohjuksiin vähemmän kuin ammusaseisiin. Ammusaseiden lentoradan määrittäminen vaatii sääolosuhteiden tarkkaa tuntemusta. Tarvittavia määreitä ovat mm. ilman tiheys, tuuli ja lämpötila. Ohjusaseilla sää vaikuttaa lähinnä maaliin hakeutumiseen, ohjustyyppistä riippuen. Pilvisellä säällä infrapunahakuiset ohjukset voivat olla käyttökelvottomia, sillä infrapunasaäteily ei läpäise pilviä riittävästi mahdollistamaan maaliin lukkiutumista. EKITO-luokan ohjuksilla voi olla myös tuulesta riippuvia rajoitteita. [2, s.37]

Tulenaloitusviive on ammusaseilla lähtökohtaisesti pienempi kuin ohjuskalustolla. Ammusilmatorjunta-aseilla kyetään pienempään viiveeseen, sillä niitä voidaan pitää pidempään valmiudessa odottamassa laukaisutapahtumaa. Nokea tulenavaus ammusaseilla voi johtaa suurempaan virheeseen ammunassa, mutta se kyetään joka tapauksessa aloittamaan nopeasti, mikä on ilmamaaleja vastaan vaikutettaessa tärkeää. Ohjusase ei välttämättä kykene reagoimaan yllättävään maaliin, mutta tämä riippuu ohjuksen teknisistä yksityiskohdista. [2, s.37-38]

Ohjuksien rakenne on jokaiselle ohjustyyppille yksilöllinen, mutta kaikki ohjukset sisältävät seuraavat osajärjestelmät: runko, moottori(t), taisteluosa, ohjautusjärjestelmä, reititysjärjestelmä, ohjaus- ja vakavointijärjestelmä sekä voimajärjestelmä. Runkoon kiinnittyvät kaikki muut ohjuksen osajärjestelmät ja sen tulee sietää laukaisusta ja suunnanmuutoksista johtuvat kiihtyvyyssrasitukset. [24, s.283]

Ohjusten moottorit voidaan jakaa toimintaperiaatteensa ja käyttötarkoituksensa mukaisesti. Toimintaperiaatteita voivat olla rakettimoottorit tai ilmareaktimoottorit. Rakettimoottorit kuljettavat mukanaan ajoaineen tarvitseman hapettimen ja ne voidaan edelleen jakaa ruuti- tai nesterakettimeoottoreihin. Ilmareaktimoottorit käyttävät hyväkseen ilmakehässä esiintyvää happea ja ne jaotellaan suihkutorpiini-, ohivirtaus- sekä patomoottoreihin. Käyttötarkoituksen mukainen jaottelu on ulosheitto-, lähtö- ja matkamoottori. Ulosheittomoottorin tehtävänä on työntää ohjus laukaisuputkesta riittävälle etäisyydelle että lähtö- tai matkamoottori voi turvallisesti toimia. Lähtömoottori kiihdyttää ohjuksen sellaiseen nopeuteen että ohjuksen ohjaaminen on mahdollista tai matkamoottori voidaan käynnistää. Matkamoottori ylläpitää saavutettua nopeutta tai työntää ohjuksen sen maksimimatkanopeuteen. [24, s.284]

Taisteluoja käsittää hyötykuorman tai taistelulatauksen. Taistelulataus perustuu yleisimmin sirpalevaikutukseen tai suunnattuun räjähdysvaikutukseen. Myös tytäkranaattien käyttö on mahdollista. [24, s.286]

Ohjautusjärjestelmän tehtävänä on muodostaa ohjuksen ohjaukseen tarvittavat komennot. Tämä voidaan toteuttaa joko ohjuksen sisäisesti tai ohjuksen ulkopuolisesta tulenjohtojärjestelmästä. Ohjukset jaotellaan ohjautusjärjestelmän mukaisesti ohjattaviin, hakeutuviin sekä suunnistaviin. Ohjattavat ohjukset eivät sisällä maalin seurantajärjestelmää, vaan ne saavat ohjauskomentonsa ohjuksen ulkopuolelta. Hakeutuvat ohjukset sisältävät sisäisen maalinseurantajärjestelmän ja ohjauskomennot muodostetaan ohjuksen sisäisesti. Hakeutuvat ohjukset voivat olla toimintatavaltaan passiivisia, puoliaktiivisia tai aktiivisia. Passiivinen hakeutuva ohjus ei lähetä mitään säteilyä ja hakeutuu maaliin seuraamalla maalin lähettämää säteilyä. Puoliaktiivisen hakeutuvan ohjuksen toiminta perustuu maalin valaisuun joko tutka- tai lasersäteilyllä. Näin ohjus saa riittävän herätteen maaliin hakeutumiselle. Maalin valaiseva järjestelmän ei tarvitse olla osa lavettia josta ohjus laukaistaan. Aktiivisesti hakeutuva ohjus valaisee maalin itsenäisesti ja hakeutuu siitä heijastuvaan säteilyyn. [24, s.286-291]

Reititykseen voidaan käyttää useita menetelmiä, riippuen ohjuksen lennon vaiheesta. Näitä vaiheita ovat lähtö, korjaus, lähestyminen sekä maaliinohjaus. Lähtövaiheessa ohjusta ei yleensä voida juuri ohjata suuresta aerodynaamisten voimien muutoksesta johtuen. Korjausvaiheessa ohjus alkaa noudattaa sille annettuja komentoja ja korjaa reittinsä halutuksi. Lähestymisvaihe käsittää sen osan matkasta, kun ohjus lähestyy kohdettaan. Maaliinohjaus tarkoittaa lennon viimeistä vaihetta jossa maalia aktiivisesti mitataan ja tehdään tarvittavat suunnanmuutokset, jotta ohjus pääsee vaikutusetaisyydelle. Ohjattavat ohjukset noudattavat yleensä maaliinohjausvaiheessa suuntalinjareititystä, joka tarkoittaa, että ohjus pyrkii pitämään itsensä maalinosoituslaitteen ja maalin välisellä suoralla. Kulmanopeusreititykseen perustuvat ohjukset mittaavat maalin ja ohjuksen välistä suuntaa ja tekevät tarvittavat korjauskomennot riippuen etäisyydestä maaliin. Tällä tavoin reitittyvä ohjus pyrkii pitämään itsensä suunnattunsa suoraan maaliin. [24, s.291-293]

Ohjaus- ja vakavointijärjestelmän tehtävänä on toteuttaa tarvittavat reititysjärjestelmän määrittämät suunnanmuutokset. Tämä voidaan toteuttaa erilaisin siivekkein, muuttamalla moottorin ulosvirtauksen suuntaa tai impulssimoottorilla. Impulssimoottorit ovat pieniä rakettimoottoreita, jotka antavat ohjukselle poikittaista liikenopeutta ja yhdessä ohjaussiivekkeiden kanssa mahdollistavat huomattavan poikittaiskiihtyvyyden. Vakavointijärjestelmä käsittää ne anturit joilla ohjus seuraa omaa liiketilaansa, esimerkiksi asento- ja kiihtyvyyssanturit. [24, s.293-295]

Ohjuksen energiajärjestelmä tuottaa muille osajärjestelmille niiden tarvitseman sähköenergian. Tämä on yleensä toteutettu lämpöparistoilla tai kaasuturbiinigeneraattorilla. [24, s. 295]

Esimerkkinä EKIT-luokan ohjuksesta tarkastellaan Neuvostoliitossa kehitettyä Igla -lähi-ilma-
torjuntaohjusta. Igla (ven. ”neula”) kehitettiin Strela-ilmatorjuntaohjuksen seuraajaksi ja ensimmäinen malli saatiin käyttöön 1981. Tämä ensimmäinen versio oli vientimalli Igla-1, sillä useiden ohjuksen tärkeiden komponenttien tuotannossa esiintyi ongelmia. Varsinainen Igla otettiin Neuvostoliitossa käyttöön 1983, tärkeimpänä erona vientiversioon on kyky olla harhautumatta lentokoneiden lämpöheitteisiin niin herkästi sekä suurempi vaikutustodennäköisyys. Lisäksi vuodesta 2003 asti tuotannossa on ollut Igla-S malli, jonka suurinta toimintaetäisyyttä on kasvatettu 6km saakka. [30]

Igla-ohjuksessa on passiivinen jäähdytetty infrapunahakupää [30]. Hakupää on kaksivärinen infrapunahakupää, joka toimii 1,5-2,5 μ m ja 3,5-5 μ m alueilla [30, 31]. Hakupään ympärillä on kolme aerodynaamista piikkiä, joiden tarkoituksena on vähentää hakupään kuumenemistä. Ohjuksen hakeutumislogiikkaan kuuluu ohjuksen ohjaaminen maaliinhakeutumisvaiheen viime hetkillä moottorista siipien tyveen. Ohjuksessa on ulosheittomoottorin lisäksi kaksivaiheinen rakettimoottori, jonka ensimmäinen vaihe kiihdyttää ohjuksen matkanopeuteen ja toinen vaihe ylläpitää saavutettua nopeutta. Vakavoittamiseen käytetään neljää siivekettä jotka aukeavat ohjuksen putkivaiheen jälkeen ja aikaansaavat pitkittäisakselin mukaisen pyörimisliikkeen. Tais-
telulataus on sirpalelataus, jossa on 1,27kg räjähdysainetta. Sytyttimenä on hidastettu iskusy-
tytin. Järjestelmään kuuluu alkuperäisessä kokoonpanossa maalinosoituslaite, joka näyttää ilma-
tilanteen 12,5km säteellä ampujasta. Itse ohjuksen suuntaaminen maaliin tapahtuu ampujan toi-
menpitein ja se laukaistaan olalta. Laukaisuputkeen on integroitu tähtäin ja sitä voidaan käyttää
maksimissaan viiden ohjuslaukauksen ampumiseen. Ohjus kykenee toimimaan 360-400m/s lä-
hestyviä maaleja sekä 320m/s loittonevia maaleja vastaan. Aseen laukaisu kestää 1,7 sekuntia
liipaiseminen painamisesta, jonka aikana ampujan on seurattava tähtäimillä maalia. Viimeinen
varmistus poistuu ohjuksesta 120m lennon jälkeen. Ohjuksen maksimikantama on 5,2km loit-
tonevia maaleja ja 4,5km lähestyviä maaleja vastaan. Minimikantama on 500m lähestyviä maa-
leja ja 800m loittonevia maaleja vastaan. Maalien minimilentokorkeus on 10m ja maksimi maa-
lityypistä riippuen 2000-3500m. [30]

3.2.2.1. Maaliin vaikuttaminen

Ohjusjärjestelmille on tyypillistä suuri ulottuvuus, tehokas vaikutus sekä lähes muuttumaton korkea tuhoamistodennäköisyys koko kantaman alueella [24, s. 28]. Ohjuksen ampumatapahuma voidaan jakaa osiin, joiden perusteella voidaan arvioida sen vaikutustodennäköisyyttä maalissa. Yksinkertaisimmillaan voidaan todeta, että yksittäisen ohjuslaukauksen tuhoamistodennäköisyys saadaan, kun kerrotaan ohjuksen osumistodennäköisyys osuneen laukauksen tuhoamistodennäköisyydellä. Tämä voidaan kirjoittaa muotoon

$$Q = P_{osuma} * P_{tuhoaminen}$$

jossa Q ilmaisee tuhoamistodennäköisyyttä yhdellä laukauksella. Ohjusten valmistaja ilmoittavat yleensä ohjuksen tuhoamistodennäköisyyden $P_{tuhoaminen}$, joka vaihtelee ohjuksen koon mukaisesti välillä 0,4 - 1,0. Tarkasteltaessa useampia laukauksia voidaan pudotustodennäköisyys ilmaista seuraavan kaavan mukaisesti

$$Q_n = 1 - (1 - (P_{osuma} * P_{tuhoaminen}))^n$$

jossa n on ammuttavien ohjuslaukausten lukumäärä. Lisäksi voidaan määrittää niin kutsuttu luotettavuuskerroin käytettäville järjestelmille, joka kuvaa kuinka usein ne toimivat suunnitellulla tavalla. Tätä luotettavuuskerrointa kuvataan tunnuksella R. Huomioiden sekä laukaisualustan ja ohjuksen luotettavuuden, voidaan kaava edelleen jalostaa muotoon

$$Q_n^R = R_{laukaisualusta} * \{1 - [1 - R_{ohjus} * (P_{osuma} * P_{tuhoaminen})]^n\}$$

, jolloin saadaan selville useiden laukausten aiheuttama kokonaistodennäköisyys maalin tuhoamiselle. [2, s.41-44]

Käyttäen edellä mainittua kaavaa, tarkastellaan esimerkkijärjestelmän tuhoamistodennäköisyyttä eri maalikuvioita vastaan.

Iglan maalin tuhoamistodennäköisyys suojaamattomia maaleja vastaan on muutaman lähteen mukaan noin 0,3 - 0,48 [31; 42]. Ohjuksen osumistodennäköisyydestä ei ole saatavilla tietoa, mutta Igla-S maallin osumistodennäköisyydeksi arvioidaan noin 0.8-0.9 [33; 34; 35]. Huomionarvoista on, että valmistajan infopakettia ohjuksesta ei ole enää saatavilla, joihin mainitut lähteet viittaavat. Täten näitä arvoja on käsiteltävä likiarvoina, eikä eksaktina tietona. Mikäli Q on edellä mainittu 0,3 - 0,48 ja P_{osuma} on 0,8 - 0,9, saadaan $P_{\text{tuhoaminen}}$ arvoksi 0,333 - 0,6. Todenäköistä on, että näitä arvoja laskettaessa on käytetty maalina helikopteria tai hävittäjää, sillä miehittämättömät lennokit ovat yleistyneet vasta viime vuosina, vaikkakin Igla on myös suunniteltu miehittämättömiä lennokkeja vastaan [30]. Täten on oletettavissa, että pienempi lennokka kärsisi suurempia vaurioita ohjuksen osumasta, mutta vastavuoroisesti ohjuksen maaliin-hakeutumislogiikkaa ei luultavasti ole optimoitu pienempiä lennokkeja vastaan.

Ottaen huomioon, että lennokit eivät juuri ole panssaroituja, voidaan olettaa, että ohjuksen tuhoamistodennäköisyys on arvioidun arvon yläpäässä. Hakupään ja hakeutumislogiikan mukainen toiminta viittaisi, ettei ohjus välttämättä hakeudu optimaaliseen kohtaan pienessä maalissa. Täten käytetään arvoja $P_{\text{osuminen}} = 0,85$ ja $P_{\text{tuhoaminen}} = 0,6$. Huomioiden laukaisualustan ja ohjuksen luotettavuuden, joille annettakoon arvot $R_{\text{laukaisulausta}} = 0,99$ ja $R_{\text{ohjus}} = 0,96$, saadaan yksittäiselle laukaukselle tuhoamistodennäköisyys 0,485.

Koska ohjusten tuhoamistodennäköisyys pysyy lähes vakiona tuhoamisalueella [24, s.28], voidaan Iglan tuhoamistodennäköisyydeksi arvioida 0,485 tehokkaalla ampumaetäisyydellä 500-4500m lähestyviä maaleja vastaan tai 800 - 5200m loittonevia maaleja vastaan. Tämä edellyttää, että maali saadaan lukittua ohjuksen hakupäähän.

Iglan hakupää havaitsee 1,5 - 2,5 μ sekä 3,5 - 5 μ m taajuusalueilla [30]. Käyttämällä Wienin siirtymälakia, voidaan arvioida mille taajuusalueelle kappaleen lähettämän säteilyn huippu sijoittuu, mikäli kappale noudattaa mustan kappaleen säteilyjakaumaa. Musta kappale tarkoittaa fysiikassa kappaletta joka absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn ja säteilee diffuusisti, eli sen radianssi on suunnasta riippumaton. Tämänkaltaisen kappaleen säteily riippuu vain sen lämpötilasta. Oikeaa ”mustaa kappaletta” ei ole olemassa, sillä kappaleen lähettämä säteily riippuu sen emissiivisyydestä, joka on kerroin joka kuvaa kappaleen säteilyn suhdetta mustan kappaleen säteilyyn. Olettamalla kappaleen emissiivisyyden olevan aallonpituudesta riippumaton vakio, noudattaa kappale mustan kappaleen säteilyjakaumaa, säteilyn voimakkuuden ollessa mustan kappaleen säteilyvoimakkuus kerrottuna emissiivisyydellä. Tämän kaltainen ”harmaan kappaleen” tarkastelu ei anna aivan tarkkaa tulosta kappaleen lämpötilasta, mutta on riittävä sen arviointiin [10, s.293-297].

Wienin siirtymälaki

$$\lambda_{maksimi} = \frac{b}{T}$$

jossa $\lambda_{maksimi}$ kuvaa säteilyn radianssin maksimia, b on vakio (0,0028976 Km) ja T lämpötila kelvineinä. Kaava voidaan esittää muodossa

$$T = \frac{b}{\lambda_{maksimi}}$$

kun halutaan ratkaista kohteen lämpötila, joka vastaa haettua aallonpituutta. [10, s.293-297]

Koska Iglassa on kaksi ”väriä” eli aallonpituusaluetta, joille sen ilmaisimet ovat herkkiä saada Wienin siirtymälakia käyttäen laskettua ne lämpötilat, joihin hakupää yrittää lukkiutua. Nämä lämpötilat ovat 1931,7 - 1159 K sekä 827,9 - 579,5 K. Celsiusasteissa ilmaistuna havaintoikkunat ovat 1658,5 - 885,8 C sekä 554,7 - 306,3 C.

Orlan-10 käyttää voimanlähteenään pientä bensiinimoottoria ja sen pakoputki on sijoitettu koneen keulaan vasemmalle puolelle, mutta on osittain näkyvissä myös oikealta puolelta ja edestä [19; 20]. Erään bensiinimoottoreiden tehokuutta mitanneen tutkimuksen mukaan pienen bensiinimoottorin pakokaasujen lämpötila vaihteli kuormituksen mukaan noin 280 - 440°C välillä [36]. On oletettavissa, että pakoputki lämpenee lähelle pakokaasujen lämpötilaa. Tämä lämpötila-alue osuu Iglan toiseen havaintoikkunaan varsin täydellisesti. On siis oletettavaa, että ohjus kykenee lukittumaan maaliin, mikäli pakoputki saadaan näkökenttään.

Blackjackin voimalähteenä toimii 8kW:n polttomoottori, joka voi käyttää polttoaineenaan JP-5 ja JP-8 luokan lentopetrolia. Moottori on sijoitettu koneen perään verhoitujen pakoputkiensa kanssa. [21] Yhdysvalloissa suoritettun tutkimuksen mukaan dieselin korvaaminen JP-8 luokan lentopetrolilla ei vaikuttanut 2,9kW apuvoimalaitteen pakokaasujen lämpötilaan [37, s.111]. Vastaavasti Yhdysvaltain maatalousministeriön (USDA) tutkimuksen mukaan dieselmoottorin pakokaasujen lämpötila on noin 204C ilman hiukkassuodatinta ja noin 371C hiukkassuodattimen kanssa [38]. Mikäli Blackjackissa on hiukkassuodatin, on se Iglan havaintoikkunan sisällä. Kirjoittajan oman arvion mukaan Blackjackissa ei ole suodatinta, jolloin sen pakokaasujen lämpötila olisi noin 200C. Käyttäen Wienin siirtymälakia, saadaan tämän lämpötilan säteilyhuipuksi 6,12µm. Tämä aallonpituus ei ole ohjuksen havaintoikkunassa, mutta kappaleen lähettämä säteily ei rajoitu pelkästään säteilyhuippuun, vaan se on jatkuva käyrä [10, s.293-297].

Planckin säteilylain mukaan musta kappale lähettää tietyssä lämpötilassa pinta-alayksikköä kohden säteilyä teholla

$$L(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 * (e^{\frac{h*c}{\lambda*k*T}} - 1)}$$

jossa L on radianssi, λ on aallonpituus, T on lämpötila, h on Planckin vakio ($6,626*10^{-34}\text{Js}$), c on valonnopeus ($2,998*10^8\text{ m/s}$) ja k on Boltzmannin vakio ($1,381*10^{-23}\text{J/K}$). [10, s.294].

Käyttämällä äsken mainittua kaavaa, saadaan Blackjackin säteilyhuipun $6,12\mu\text{m}$ radianssin arvoksi $97160545\text{ W*sr}^{-1}\text{m}^{-3}$ lämpötilalla $473,15\text{K}$. Iglan ylemmän havaintoikkunan $3,5 - 5\mu\text{m}$ alueella $473,15\text{K}$:n lämpöinen kohde säteilee vastavuoroisesti $38260848 - 87304031\text{ W*sr}^{-1}\text{m}^{-3}$ radiansseilla, eli $39,4 - 89,9\%$ intensiteetillä säteilyhuipun maksimiarvosta. Täten voidaan todeta, että vaikka lennokka ei säteile kirkkaimmillaan Iglan hakupään alueella, on sillä kuitenkin merkittävästi säteilyä tällä aallonpituusalueella ja ohjuksella on todennäköisesti kyky lukkiutua siihen.

Black Hornet käyttää voimanlähteenään puolestaan akkua [14; 15; 16]. Arvioidaan lennokin lämmöntuottoa seuraavan menetelmän kautta. Black Hornet painaa 33g [14; 15; 16], ja Maapallon putoamiskiihtyvyys vetää sitä puoleensa $9,81\text{m/s}^2$ [10, s.15]. Newtonin III lain mukaan kappaleiden välillä vuorovaikutustilanteessa vallitsee yhtä suuri mutta vastakkaissuuntainen voima [10, s.30]. Täten, mikäli lennokka pyrkii leijumaan paikallaan ilmassa, on sen saatava aikaiseksi voima, joka kumoaa putoamiskiihtyvyyden lennokkiin aiheuttaman voiman. Putoamiskiihtyvyyden aiheuttama voima on

$$F = \frac{m}{a}$$

jossa F on aiheutettu voima, m on kappaleen massa ja a on kiihtyvyys (tässä tapauksessa g, eli putamiskiihtyvyys $9,81\text{m/s}^2$) [10, s.30-31]. Lennokkiin vaikuttaa siis $0,32373\text{ N}$ voima. Lennokin ilmaan kohdistama voima on leijunnassa siis yhtä suuri, mutta vastakkaismerkkinen. Lennokin lapojen halkaisija on 123mm [14]. Käyttämällä kaavaa

$$P = K \frac{m^{3/2}}{r}$$

jossa P on teho, K on ilmantiheydestä riippuva vakio (22.35 yhdessä ilmakehän paineessa, ilman lämpötilan ollessa 20C), m on lennokin massa ja r lapojen halkaisija [39] saadaan leijuntaan vaadittavaksi tehoksi 1,09 W. Erään pienen noin 11g painavan lennokeissa käytetyn moottorin lämpötilan nousuksi wattia kohden ilmoitetaan 52,4 C/W [40]. Täten voidaan olettaa 33g painavan Black Hornetin olevan ominaisuuksiltaan jokseenkin samanlaisia. Tällöin Black Hornetin moottori lämpenisi leijunan aikana noin 57,1C aloituslämpötilasta, tässä tapauksessa 20C, jolloin kokonaislämpötila olisi 77,1C. Liikkeeseen tarvitaan vielä enemmän energiaa, joten pyöristetään lämpötila 80C. Käyttäen aikaisemmin mainittua Planckin lakia, saadaan 353,15K kohteen säteilyn radianssiksi 3,5 - 5µm taajuusalueella $1998291 - 11034377 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, joka vastaa noin 2,1 - 11,3% Blackjackin radianssista kyseisellä taajuusalueella. Radianssi ilmaisee kappaleen lähettämän säteilyn intensiteetin pinta-alayksikköä kohden [9, s.55]. Black Hornet on hyvin pieni, vain muutamien senttimetrien kokoluokkaa, joten sen kokonaisuudessaan lähettämä säteily on verrattain vaatimatonta, huomioiden että lasketussa esimerkissä huomioitiin lennokin moottorin lämpenemistä, joka on sijoitettuna lennokin sisälle ja on lapojen aiheuttaman ilmapirran jäähdyttämää. Täten voidaan pitää Iglan lukittumista Black Hornettiin epätoennäköisenä, mutta mahdollisena, ainakin lyhyille etäisyyksille.

Aikaisemmin esitetyn perusteella voidaan Iglan vaikutusta tutkittuja lennokkeja vastaan esittää taulukolla 18.

Taulukko 18. Iglan tuhoamistodennäköisyydet lennokkeja vastaan.

Ampumaetäisyys (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000
Tuhoamistodennäköisyys yhdellä laukauksella Orlan-10 ja Blackjackia vastaan	0	0,485	0,485	0,485	0,485	0,485	0,485
Thusomditodennäköisyys kahdella laukauksella (vähintään yksi osuma) Orlan-10 ja Blackjackia vastaan	0	0,732	0,732	0,732	0,732	0,732	0,732
Osumatodennäköisyys Black Hornettia vastaan	0	Lukittumisen epätoennäköistä	Lukittumisen epätoennäköistä	Lukittumisen epätoennäköistä	Lukittumisen epätoennäköistä	Lukittumisen epätoennäköistä	Lukittumisen epätoennäköistä

Olalta laukaistavilla ilmatorjuntaohjuksilla saavutetaan siis vajaan 50% tuhoamistodennäköisyys tarkasteltuja lennokkeja vastaan, poisluettuna pienin Black Hornet, jota vastaan on syytä epäillä ohjuksen lukittumista. Jotta saavutettaisiin yli 50% tuhoamistodennäköisyys, on Orlan-10 ja Blackjackia vastaan ammuttava kaksi ohjusta, jolloin tuhoamisen todennäköisyys nousee 73,2 prosenttiin.

3.3. Sähkömagneettisella spektrillä vaikuttaminen

Sähkömagneettinen säteily on valonnopeudella etenevää säteilyä jonka ominaisuudet riippuvat sen aallonpituudesta. Valo itsessään on sähkömagneettista säteilyä. Sähkömagnetismin nimi juontuu James Maxwellin esittämiin lakeihin, joissa sähkö- ja magneettivoima esitettiin yhden ja saman voiman osasiksi. Tämän luonnon perusvoiman välittäjähiukkasena ja kvanttina toimii foton. Sähkömagneettista säteilyä kuvataan usein aaltona, mutta tietyissä tapauksissa sitä voidaan kuvata myös hiukkasena, fotonina. Fotonin aallonpituus, ja sitä kautta energia, vaikuttaa merkittävästi siihen, miten se vuorovaikuttaa materian kanssa. [9, s. 41-48]

Aikaisemmin tässä kappaleessa on käsitelty sähkömagneettisen säteilyn ominaisuuksia tarkasteltaessa ohjuksen hakupään kykyä lukittua maaliin. Tällöin käsiteltiin kappaleen lähettämää lämpösäteilyä, jonka aallonpituus on kappaleen lämpötilasta riippuvainen. Sähkömagneettisen säteilyn jakaumaa eri aallonpituuksille kutsutaan sähkömagneettisen säteilyn spektriä. Riippuen tarkasteltavasta spektrin alueesta ja käyttökohteesta riippuen voidaan näistä spektrin alueista käyttää eriäviä, osin päällekkäisiä, nimityksiä [9, s.41-45]. Sähkömagneettisen säteilystä saatetaan myös puhua taajuuden mukaan jaoteltuna, mutta tämä on lähes sama asia kuin aallonpituuteen perustuva jaottelu, sillä

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

jossa λ = aallonpituus, c = valonnopeus tyhjiössä ja f = taajuus [9, s.41-45]. Tämä pätee valonnopeuden väliaineessa ollessa lähellä sen nopeutta tyhjiössä ja on riittävä tarkkuudeltaan tarkasteltaessa ilmassa tapahtuvaa sähkömagneettisen säteilyn etenemistä [9, s. 45].

Eri spektrin alueita käytetään laajalti sotilassovelluksissa. Radioaaltoja ($\lambda \approx \infty - 10\text{cm}$, $f \approx \infty - 3\text{GHz}$) käytetään viestiliikenteen välittämiseen sekä joissain tutkajärjestelmissä. Mikroaaltoja ($\lambda \approx 10\text{cm} - 1\text{mm}$, $f \approx 3 - 300\text{GHz}$) käytetään myös tiedonvälitykseen ja tutkajärjestelmiin. Tätä lyhyemmän aallonpituuden säteilystä ei yleensä puhuta taajuuden mukaan. Infrapunasäteilyä ($\lambda \approx 1\text{mm} - 780\text{nm}$) hyödynnetään sensoriteknologiassa havaitsemaan lämpimiä kohteita sekä kohteiden etäisyyden mittaukseen ja valaisuun. Näkyvän valon aluetta ($\lambda \approx 780\text{nm} - 400\text{nm}$) hyödynnetään kaikessa missä ihmisen tulee nähdä jotain. Ultraviolettisäteilyä ($\lambda \approx 400\text{nm} - 100\text{nm}$) lähettävät kohteet ovat lämpötilaltaan korkeita. Rakettimoottorien lämpötila kohoaa yli 2000K, joten tätä aallonpituusalueita käytetään ohjusvaroittimissa. Tätä lyhyemmän aallonpituuden säteily vaimenee ilmakehässä hyvin voimakkaasti, eikä sitä voida juuri soveltaa sotilaskäytössä. Röntgensäteilyä esiintyy ydinaseiden räjähtäessä. [9, s.41-87]

Sähkömagneettista säteilyä voidaan käyttää myös kohteen tuhoamiseen. Suunnatun energian aseet (DEW, directed energy weapon) perustuvat suurienergiseen sähkömagneettisen säteilyn pulssiin tai suureen nopeuteen kiihdytettyihin hiukkasiin. Nämä aseet voidaan jaotella vaikutukseen johtavan aallonpituuden ja mekanismin mukaan. Suurtehomikroaaltoase (HPM, high.power microwave) sekä EMP (electro magnetic pulse) pyrkivät tuhoamaan kohteen puolijohteet käyttäen hyväksi sähkökentän energiaa. EMP-asetta ei käsitellä tässä tutkimuksessa, sillä vaadittavan pulssin tuottoon vaaditaan joko ydinase tai asejärjestelmä (räjähdykseen perustuva) joka on toimintamekansimiltaan varsin samankaltainen HPM-aseen kanssa, toiminta-alueeltaan tosin matalampi. Tuhoamiseen tai vaurioittamiseen voidaan käyttää myös laseria, jolla kohteeseen syötetään suuri määrä energiaa lyhyessä ajassa, jolloin se vaurioituu tai tuhoutuu joko lämpövaikutuksesta tai mekaanisesta rasituksesta. [9, s.417]

Suunnatun energian aseilla on useita ominaisuuksia, jonka vuoksi niitä on pyritty aktiivisesti kehittämään. Aseilla saadaan lähes välitön vaikutus maaliin ja tämän nopeuden seurauksena ei ennakkoa tarvitse käytännössä ottaa maaliin. lähes välitön vaikutus myös estää aktiivisten vastatoimenpiteiden käynnistämisen. Suunnatun energian aseilla on myös kyky vaikuttaa useita maaleja vastaan joko samanaikaisesti tai lyhyellä välillä. Koska asejärjestelmät käyttävät voimanlähteinään pääsääntöisesti sähköä, on niiden käyttö myös hyvin edullista. Näillä järjestelmillä on toki omat heikkoutensa. Lähtökohtaisesti maalin on oltava näköyhteysreitillä, eli maalin ja asejärjestelmän välillä on oltava katkeamaton suora. Ilmakehän ominaisuudet vaikuttavat aseiden tehoon vaimennuksen myötä ja riippuen käytetystä aallonpituusalueesta, myös sääolosuhteet. Vaikutusmekanismi maaliin on usein monimutkainen ja vaikutuksen todentaminen voi olla hankalaa, ellei käytössä ole muita dataa tuottavia järjestelmiä, esimerkiksi tutkaa. Teknologia on myös uutta eikä sitä ole vielä otettu laajamittaisesti käyttöön. [9, s.417]

3.3.1. Mikroaaltoase

Suurtehomikroaaltoaseen vaikutus perustuu suurienergiseen ja suuritaajuiseen sähkömagneettiseen pulssiin [9, s.418]. Aseen tuottama sähkömagneettinen säteily suunnataan kohteeseen ja johon se voi vaikuttaa kahden eri mekanismin avulla, suoran ja epäsuoran tunkeutumisen kautta. Epäsuorassa tunkeutumisessa aseiden toiminta perustuu sähkömagneettisen säteilyn tunkeutumiseen laitteen sisälle luukkujen, rakojen ja vastaavien kautta, aiheuttaen tuhoa laitteen sisällä virtapiireille. Suora tunkeutuminen tarkoittaa lähetetyn sähkömagneettisen säteilyn induoitumista kohteen antenneihin ja johtimiin, mikä aiheuttaa ylikuormituksen vuoksi vaurioita kohteessa. [9, s.418].

Vaikutukseen tarvittava pulssi voidaan synnyttää usean eri mekanismin kautta. Ensimmäisenä näistä tarkastellaan räjähdykseen perustuvaa järjestelmää. Tämän kaltaisen järjestelmä toimii karkeasti seuraavasti. Kondensaattoriin varataan suuri jännite, joka puretaan kelaan. Juuri kuin kelaan syntynyt sähkövirta saavuttaa suurimman arvonsa, kelan sisällä oleva metallilieriö räjäytetään, jolloin kelan sisällä olevalle magneettivuolalle jää vähemmän tilaa, aiheuttaen magneettikentän muutoksen. Tämä magneettikentän muutos saa aikaan suuren virranmuutoksen kelaan. Näin saatu nettovirta johdetaan seuraavaan kelaan, jossa prosessi toistetaan. Lopulta virta johdetaan esimerkiksi vircator-putkeen (virtual cathode oscillator) ja siitä antenniin. Tämän kaltaisen järjestelmä voidaan asentaa esimerkiksi ohjukseen. Järjestelmä on toimintaperiaatteensa puolesta kertakäyttöinen, sillä räjähdykset eivät ole toistettavissa. [9, s.419-420] Näitä järjestelmiä ei käsitellä tutkimuksessa, sillä ohjukseen sijoitettu HPM-ase vaatisi samankaltaisen hakeutumisjärjestelmän kuin perinteinen ilmatorjuntaohjus, mutta sen taistelulataus olisi huomattavasti monimutkaisempi ja täten kalliimpi. On tosin huomioitava, että tämänkaltaisen ohjuksen vaikutussäde voi olla suurempi, jolloin sillä olisi kyky torjua useita, tiiviisti ryhmittyneitä lennokkeja, paremmin kuin perinteisellä ilmatorjuntaohjuksella, joka pyrkii vaikuttamaan yhtä kohdetta vastaan [9, s.429].

Toinen vaihtoehto säteilyn synnyttämiselle on suoraan sähkövirralla, kuten vastaavan aallonpituuden tutkissa. Tämänkaltaisen kiinteä tai lavetille asennettu järjestelmä kykenee hyödyntämään suurempaa antennia ja siten kohdistamaan tuotetun energian paremmin. Järjestelmä vaatii kuitenkin merkittävän sähkölähteen. [9, s.418-421]

Esimerkijärjestelmänä tarkastellaan Raytheonin kehittämää PHASER-järjestelmää. Tarkkoja yksityiskohtia järjestelmästä ei ole saatavilla, sillä järjestelmä on vielä kehityksessä. Yhdysvaltain ilmavoimien 23.9.2019 myöntämä 16,2 miljoonan dollarin sopimus viittaa järjestelmän kehityskelpoisuuteen [41; 42; 43]. Valmistajan mukaan järjestelmä on testeissä kyennyt torjumaan 2-3 lennokkia kerrallaan, pudottaen yhteensä 33 lennokkia yhdessä harjoituksessa [44]. Järjestelmä on sijoitettu 6 metriä pitkään merikonttimaiseen rakennelmaan [41; 43]. Järjestelmä kerrotaan kykenevän vaikuttamaan Yhdysvaltain armeijan lennokkiluokittelun ensimmäisen ja toisen luokan lennokkeihin [43; 45; 46]. Tämän luokituksen mukainen luokan kaksi lennokki on lentoonlähdepainoltaan alle 25 kg ja sen lentokorkeus on korkeintaan noin kilometri [12]. Järjestelmää ei ole testattu kolmannen luokan (alle 600kg, maksimilentokorkeus 5,5km) lennokkeja vastaan näiden lennokkien korkean hinnan vuoksi [43]. Järjestelmän tehokas etäisyys on salaista tietoa, mutta Raytheonin suunnatun energian aseiden teknologiajohtajan mukaan se on pienempi kuin saman yrityksen korkeateholaseraseella, jonka tehokkaaksi etäisyydeksi mainitaan 3-5 km [45]. Näiden tietojen perusteella arvioidaan järjestelmän kantamaksi noin 1-3km.

Tarkasteltavista lennokeista Black Hornet on Yhdysvaltain armeijan luokituksen 1 lennokka ja Orlan-10 luokituksen 2 lennokka. Blackjack kuuluisi tämän luokituksen mukaan luokaan 3, sillä sen lentoonlättopaino on 62kg ja maksimilentokorkeus 6000m. Tutkimuksessa käytetty NATO:n luokittelu on Yhdysvaltain armeijan luokittelusta poikkeava, minkä vuoksi lennokit kuuluvat eri luokkiin järjestelmän ilmoitetun suorituskyvyn mukaan. PHASER-järjestelmän kantaman ollessa luokiteltua tietoa, käytetään korkeimpana vaikutusetäisyytenä keskiarvoa arvoidusta kantamasta, joka on 2km. HPM-aseen vaikutusmekanismin johdosta sen on tuotettava tarpeeksi voimakas mikroaaltopulssi saavuttaakseen vaikutuksen kohteessa, voidaan ase tuhoamistodennäköisyyttä pitää vakiona tehokkaalle kantamalle saakka, jonka jälkeen se laskee nollaan. Järjestelmän kyky vaikuttaa tutkittuja lennokkeja vastaan on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. PHASER-järjestelmän tehokas vaikuttamisetäisyys.

Ampumaetäisyys (m)	300	500	1000	1500	2000	2500	3000
Tuhoamistodennäköisyys Black Hornet ja Orlan-10 lennokkeja vastaan	1	1	1	1	1	0	0
Tuhoamistodennäköisyys Blackjackia vastaan	Vaikutus mahdollinen	Vaikutus mahdollinen	Vaikutus mahdollinen	Vaikutus mahdollinen	Vaikutus mahdollinen	0	0

3.3.2. Laserase

Laseraseet ovat suunnatun energian aseita. Aseen toimintaperiaate perustuu tarpeeksi suuritehoisen sähkömagneettisen säteilyn lähettämiseen, jolla pyritään joko vaikuttamaan kohteen toimintaan tai tuhoamaan se. Lasersäteen teho vaimenee väliaineessa aallonpituudesta riippuen, joten pitemmillä etäisyyksillä ei välttämättä saavuteta riittävää energiatihyyttä vaikutuksen saamiseen. Aseen vaikuttavuus riippuu myös maalin heijastuvuusominaisuuksista fyysisten parametrien lisäksi. [9, s. 417]

Laseraseet voidaan jakaa karkeasti kahteen tyyppiin, sokaisulasereihin sekä suurteholasereihin. Sokaisulaserin tarkoituksena on nimensä mukaisesti sokaista maalina olevan ohjuksen, lennokin tai muun tähystyslaitteen hakupää tai optiikka. Tällä pyritään epäämään maalin tehtävän täyttäminen, vähän samaan tapaan kuin ilmatorjunnassa tulitehtävällä ”häirintä” pyritään häiritsemään vastustajaa, siten ettei se kykene suorittamaan tehtäväänsä, vaikkei välttämättä tuhoutuisikaan. Suurteholaserit puolestaan pyrkivät fyysiseen vaikutukseen kohteessaan. Riittävän suurella hetkellisellä energiamäärällä kohteessa pyritään joko kuumentamaan sitä kohteen vaurioittamiseksi tai tuhoamaan sen rakenteita höyrystämällä tai sulattamalla. [9, s.433]

Laserilla on monia käyttökohteita sotilasteknologiassa. Näihin lukeutuvat muun muassa tietoliikenne-, sensori-, ase- ja omasuojajärjestelmät. Laser on lyhenne sanoista Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. [9, s.338-339] Nykyään tätä sanaa käytetään yleisnimenomaisesti. Laser on laite joka tuottaa monokromaattista ja koherenttia kollimoitua säteilyä [9, s.339]. Tämä tarkoittaa, että valo on ”yhdenväristä” eli sillä on tietty tarkka aallonpituus, aallot kulkevat samassa vaiheessa ja ne ovat yhdensuuntaisia, jolloin saavutettu säteilyteho ei vähenne leviämisen tai keskinäisen vuorovaikutuksen vuoksi. Säteilyn monokromaattisuus ja koherenttius ovat tärkeässä roolissa laserin muodostamisessa. Tämä johtuu ilmiöstä nimeltä interferenssi, joka tarkoittaa fotonien kykyä vaikuttaa toistensa (ja jopa itsensä) kanssa. Periaate on yksinkertainen, mikäli aallot ovat samassa vaiheessa, niiden minimi- ja maksimit tapahtuvat samaan aikaan samassa paikassa, vahvistuen toisiaan. Vastavuoroisesti minimien ja maksimien osuessa toistensa päälle, ne neutraloivat toisensa. Asian ymmärtämistä helpottaa valon ajatteleminen aaltolina. Monokromaattisuuden tärkeys johtuu siitä yksinkertaisesta totuudesta, että aallot joilla on eri aallonpituus, eivät voi saavuttaa tämänkaltaista jaksollisuutta. [9; 10]

Laserlaite tarvitsee toimiakseen neljä komponenttia, aktiivisen lasermateriaalin, viritysmekanismin, heijastavan peilin ja puoliläpäisevän peilin. Aktiivisessa lasermateriaalissa olevia atomeita viritetään korkeampaan energiatilaan, jolloin ne lähettävät aineelle ominaista säteilyä. Viritysmekanismin tarkoituksena on syöttää lasermateriaaliin lisää energiaa. Tämä voidaan toteuttaa optisen, sähköisen tai kemiallisen menetelmän avulla. Heijastava peili on laitteen toisessa päässä ja heijastaa siihen tulevan säteilyn takaisin. Puoliläpäisevä peili heijastaa suurimman osan säteilystä takaisin lasermateriaaliin, mutta päästää pienen osan säteilystä lävitseen. Tämä pieni osa on lasersäteily jonka havaitsemme. [9, s.339]

Laserit voidaan jakaa useisiin luokkiin. Kiinteäainelaserit käyttävät lasermateriaalina kiinteää kristallia tai tankoa, johon on väliaineeseen lisätty niitä atomeja, joita halutaan käyttää laserin muodostamiseen. Laserin ominaisuudet riippuvat aktiivimateriaalista sekä väliaineesta. Kiinteäainelaserilla on hyvä suorituskyky ja ne ovat verrattain helppohuoltoisia. Kiinteiden aktiivimateriaalien ja pumppauslasereiden massatuotettavuus laskee tämän laserlaitteen valmistuskustannuksia. Eri materiaaleilla saavutetaan eri aallonpituuksia 0,66 - 1,18 μ m alueella. [9, s.340-341]

Puolijohde-, eli diodilaserit, ovat hyvin pienikokoisia ja tehokkaita laserlaitteita. Niiden koko on yleensä alle yhden millimetrin. Laseraine on puolijohdemateriaalikerroksista koottu. Rakenteesta löytyy vain yksi aktiivinen kerros, joka tuottaa laservahvistusta. Tyypillinen aallonpituusalue on 0,1 - 1,55 μ m. [9, s.340]

Kaasulasereissa käytetään nimensä mukaisesti kaasua aktiivimateriaalina. Viritysmekanismina toimii kaasun läpi johdettu sähkövirta. Myös optista pumpppausta salamalampulla tai toisella laserilla voidaan käyttää viritysmekanismina. [9, s.340]

Kemiallisten laserien pumpppaamiseen käytetään kemiallista reaktiota. Tunnetuimpia kemiallisia lasereita ovat vetyfluoridi- ja deuteriumfluoridilaserit. Niiden aallonpituusalueet ovat 2,6-3,3 μ m vetyfluoridille ja 3,5-4,2 μ m deuteriumfluoridille. [9, s.340]

Fotonit vuorovaikuttavat edetessään väliaineen ja kohtaamansa materian kanssa. Tämä vuorovaikutus johtaa sähkömagneettisen aallon vaimenemiseen etenemissuunnassaan. Tätä kutsutaan absorptioksi. Ilmiö johtuu siitä, että aalto saa kohtaamansa varautuneet hiukkaset värähtelemään tai virittää ne korkeampaan energiatilaan. Osa energiasta palaa säteilyksi virittyneen hiukkasen lähettäessä fotonin palatessaan perustilaansa. Tämä foton saattaa kuitenkin sirota uuteen suuntaan. Mikäli fotonin energia muuttuu hiukkasen värähtelyliikkeeksi, tarkoittaa tämä käytännössä kohteen lämpötilan nousua, sillä lämpötila on kappaleen hiukkasten keskimääräistä liike-energiaa. [10, s.128-129, 287]

Absorption ymmärtäminen on laseraseen toiminnan kannalta merkityksellistä, sillä kulkiessaan ilmassa (tai muussa väliaineessa) säteen teho heikkenee. Törmätessään kohteeseensa osa säteilystä myös heijastuu kohteesta imeytymättä siihen. Laseraseella voidaan pyrkiä vaikuttamaan kohteeseen, tässä tapauksessa lennokkiin, kahden mekanismin kautta, sokaisemalla tai vaurioittamalla kohteen sensoreita tai fyysisesti tuhoamalla lavetti.

Operatiivisessa käytössä on ainakin yksi laserase, LaWS (Laser Weapon System) [47]. Järjestelmän teho on 30kW [47]. Lisäksi Dynetics-Lockheed:lle on myönnetty 130 miljoonan dollarin sopimus HEL TVD (High Energy Laser Tactical Vehicle Demonstrator) järjestelmän kehittämiseen [48]. Järjestelmän tavoitteena on tuottaa 100kW teho, vähintään 30cm lähettimellä, adaptiivisella optiikalla kuorma-autoon asennettuna [49]. Järjestelmää on tarkoitus demonstroida 2022 [49].

Laseraseella sen lähettämä säde pyritään keskittämään mahdollisimman pienelle alueelle. Tätä voidaan arvioida seuraavan kaavan avulla

$$w_o \approx M^2 \frac{2 * \lambda * l}{\pi D}$$

jossa w_0 kertoo laserlähetteen minimisäteen, M^2 on säteen laatua kuvaava termi, l on etäisyys kohteeseen ja D on lähetteen suuntaamiseksi käytetyn peilin koko [50, s.38-41].

Osa lasersäteilystä siroaa tai absorboituu ilmakehän hiukkasiin ja molekyyliin. Säteen tehoa tietyllä etäisyydellä voidaan ilmaista

$$P = P_0 * e^{(-\sigma * R)}$$

jossa P_0 on lähteen teho, e on Neperin luku, σ on kokonaisvaimennuskertoimen ($1/\text{km}$) ja R on etäisyys kilometreissä. [51]

Arvioidaan näiden kahden järjestelmän tehoa eri etäisyyksillä. LaWS:n optiikan halkaisija on noin 60cm [52] ja HEL TVD:n minimissään 30cm [49]. Käytetään aallonpituutena sotilaskäytössä yleistä neodyymi-YAG-laserin aallonpituutta, joka on $1,064\mu\text{m}$ [9, s.343], joka on kiinteäainelaser [9, s.342]. Rheinmetall käyttää omissa kokeellisissa laseraseissaan 10kW-luokan laserlähettämiä joiden M^2 on alle 2,5, mainiten että tehokkaampien 50kW-luokan lasereiden M^2 on yli 10 [53]. Suurempia tehoja saavutetaan suuntaamalla useampi lähete samaan pisteeseen [53]. LaWS käyttää useampaa laseria yhteen pisteeseen suunnattuna, oletettavasti myös HEL TVD. Arvioidaan M^2 arvon olevan 2,5. Kokonaisvaimennuskertoimen on säätötilasta riippuvainen ja vaihtelee välillä 0,11 - 0,92 [9, s.344] Käyttäen edellä mainittuja kaavoja, saadaan aseiden tehoksi eri etäisyyksille ja vaimennuskertoimille taulukkojen 20 ja 21 arvot.

Taulukko 20. Kokonaisvaimennuskertoimen arvolla 0,9.

AMET	300	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
LaWS (kW/cm ²)	1016,8	366,1	91,5	40,7	22,9	14,6	10,2	7,5	5,7	4,5	3,7
HEL TVD (kW/cm ²)	847,4	305,0	76,3	33,9	19,1	12,2	8,5	6,2	4,8	3,8	3,1

Taulukko 21. Kokonaisvaimennuskertoimen arvolla 0,1.

AMET	300	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
LaWS (kW/cm ²)	1292,6	465,4	116,3	51,7	29,1	18,6	12,9	9,5	7,3	5,7	4,7
HEL TVD (kW/cm ²)	1077,2	387,8	96,9	43,1	24,2	15,5	10,8	7,9	6,1	4,8	3,9

[illegible]

4. KUSTANNUSTEHOKKUUS

4.1. Kustannustehokkuuden määrittely

”Puolustushallinnon materiaalipolitiikan tavoitteena on pitkäjänteisesti ylläpitää ja kehittää sotilaallista suorituskykyä hankkimalla puolustusvoimien tehtäviin soveltuvaa ja kansainvälisesti yhteensopivaa materiaalia ja palveluita. Materiaalipolitiikalla lisäksi varmistetaan suorituskyky, materiaalin kustannustehokkuus ja elinjakson hallinta myös poikkeusoloissa.” [55]

Kustannustehokkuus on Puolustushallinnon materiaalipolitiikan yksi merkittävimmistä tekijöistä. Syynä tähän lienee sotilasteknologian kustannusten jatkuva kasvaminen [56, s.20]. Puolustusmateriaalin yksikkökustannukset nousevat noin 7-10% vuosittain, ylläpitokustannusten noustessa 6-10%. Ilmiön taustalla on materiaalin teknistyminen ja monimutkaistuminen. Tämän monimutkaistumisen seurauksena järjestelmien vikaväli pienenee, sillä niissä on enemmän rikkoontuvia komponentteja. Kohoavien kustannusten seurauksena on harkittava tarkoin, minkälaista suorituskykyä on välttämätöntä hankkia ja mihin varat todellisuudessa riittävät. Tähän tavoitteeseen voidaan päästä suosimalla yleiskäyttöisiä ja yhdenmukaisia laitteita, jolloin järjestelmien osia voidaan vaihtaa keskenään ja niiden ylläpitojärjestelmiä voidaan hyödyntää ristiin. Tämä ajaa myös tarpeeseen maksimoida kriisiajan sotilaallinen suorituskyky järjestelmien lukumäärän kustannuksella. [56, s.20-21]

Elinjaksokustannus sisältää kaikki kustannukset jotka liittyvät suorituskyvyn luomiseen ja omistamiseen. Ne voidaan jakaa suorituskyvyn luomiseen ja purkamiseen liittyviin kustannuksiin, jotka ovat kertaluotoisia, sekä jatkuviin omistamiseen liittyviin kustannuksiin. Luomisen ja perustamisen kustannukset jaetaan edelleen materiaalin, henkilöstön, infrastruktuurin ja tukeutumisen sekä palveluiden aiheuttamiin kustannuksiin. Omistamisen kustannukset jaetaan vastaavasti materiaalin, henkilöstön sekä infrastruktuurin ja tukeutumisen kustannuksiin. [56, s.44]. Suorituskyvyn elinjakson aikana syntyy siis suuri määrä erilaisia kustannuksia.

Kustannustehokas (eng. cost-effective) tarkoittaa Cambridgen yliopiston määritelmän mukaan ”aktiviteettia jolla saadaan hyvä arvo maksettuun rahamäärään verrattuna” tai ”kustannustehokas metodi tai prosessi tuottaa suurimman edun tai tuloksen käytettyyn määrään verrattuna” [57]. Tämän tutkimuksen aiheena on lennokkien torjunta, joten tutkimuksen viitekehyksessä kustannustehokkuudella tarkoitetaan niiden kustannusten minimointia joka johtaa lennokin torjuntaan. Edellisessä kappaleessa mainittu omistamisen kustannusten saralta tähän lukeutuu materiaalikustannukset, siltä osin kuin ne koskevat lennokin torjumiseen liittyviä kustannuksia.

4.2. Kustannustehokkuuden malli

Kustannustehokkuuden määritelmän ollessa ”pienin hinta jolla lennokka voidaan torjua”, on mallin luominen verrattain helppoa. Vertaamalla eri järjestelmien käyttökustannuksia toisiinsa eri ampumaetäisyyksille ja eri maaleja vastaan saadaan selville järjestelmien keskinäinen kustannustehokkuus. Fyysisen vaikuttamisen järjestelmillä tämä tarkoittaa lennokin tuhoamiseksi, tietyllä varmuusasteella, vaadittujen ammusten hintaa. Vastaavasti elektronisen vaikuttamisen järjestelmillä tuhoamisen hinnaksi muodostuu tarvittavan energian tuottamiseen vaaditun energianlähteen kulutuksen mukainen hinta. Tämä voidaan ilmaista

$$K_{\text{pudottamisen kustannus}} = H_{\text{ammuksen hinta}} * X_{\text{vaadittu laukausmäärä halutulla varmuusasteella}}$$

Laajennettaessa kustannustehokkuuden määritelmää koskemaan myös järjestelmän hankintahintaa, saadaan selville, kuinka monta lennokkia järjestelmän olisi tuhottava toisiin nähden säävuttaakseen elinjaksollaan saman kustannustehokkuuden lennokin pudottamiseen. Tällöin kustannustehokkuutta voidaan ilmaista

$$K_{\text{keskimääräisen pudotuksen hinta}} = \frac{H * X * N + J_{\text{järjestelmän hinta}}}{N}$$

jossa N on pudotettujen lennokkien lukumäärä. On huomion arvoista, että tämä ei takaa kustannustehokkuutta koko järjestelmän elinjaksolla, sillä koulutukseen, varastointiin, kunnossapitoon ja muihin seikkoihin kuluva kustannuksia ei ole huomioitu. Esitetyillä kaavoilla voidaan kuitenkin yksinkertaistetusti arvioida eri järjestelmien keskinäistä kustannustehokkuutta.

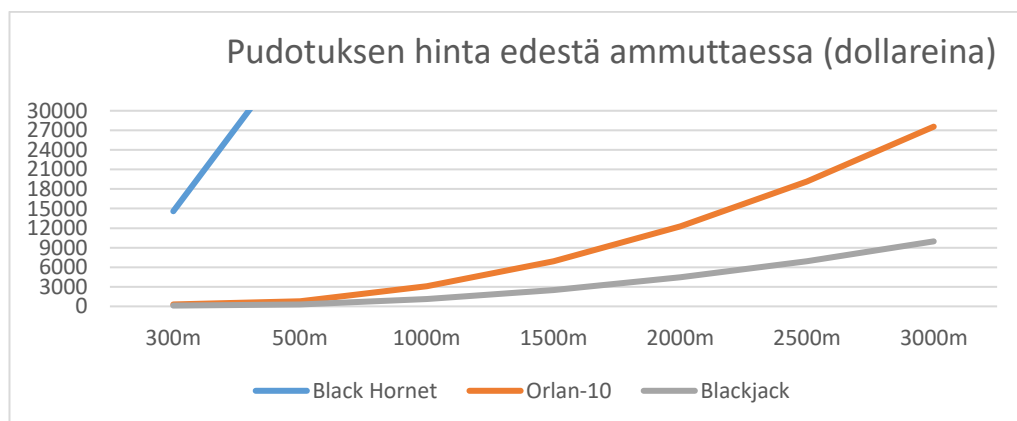
4.3. Järjestelmien vertailu

Tutkittujen järjestelmien osumis- ja tuhoamistodennäköisyyksiä on käsitelty aiemmin, mutta ammusten hintaa ei. Kuten muun sotamateriaalin kanssa, on luotettavien hintatietojen hankkiminen vaativaa myös ammusten osalta, sillä valtiot pyrkivät pitämään yksityiskohdat salassa. Tämän vuoksi tutkimuksessa käytetään likiarvoja, jotka on pyritty perustelemaan saatavilla olevilla, joskin jossain määrin epäluotettavilla lähteillä. Saadut hintatiedot on pyritty tutkijan parhaan kyvyn mukaan samaan oikeaan kertaluokkaan, jolloin järjestelmien keskinäinen vertailu on mahdollista, vaikkei antaisi täysin täsmällisiä arvoja.

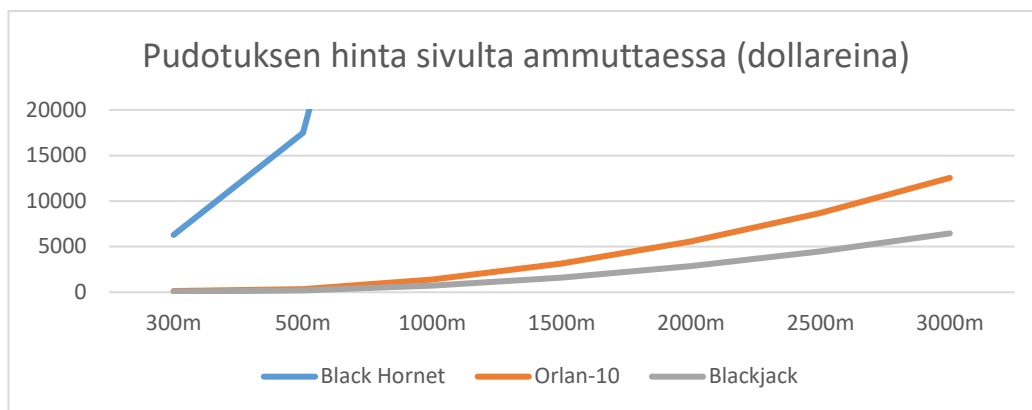
Fyysiseen vaikutukseen pyrkivien järjestelmien osalta ammusten hintoja voidaan arvioida seuraavien tietojen perusteella. Ensimmäisenä käsitellään ammusaseita. Forecast International on markkinoiden seurantaan ja ennustamiseen perustuva yritys, jonka erityisosaamisaluetta on ilmailu-, puolustus- elektroniikka- ja voimantuottojärjestelmien seuranta [58]. Yrityksen vuoden 2010 loppuvuodelle päivätyn raportin mukaan keskikaliiperin (20-57mm) ammusten hinta oli pienimmillään 1,12\$ per laukaus 20x120mm ammuksille ja suurimmillaan 23,83\$ per laukaus 40x365mm laukauksille, hinnat ovat vuoden 2010 dollareissa [59]. Vuoden 2020 kurssilla tämä tarkoittaa noin 1,33 - 28,27 \$ per laukaus. ZU-23-2 käyttää 23x152mm laukauksia [26], jolloin on oletettavissa, että laukausten hinta on annetun rajan alapäässä. AHEAD-ammukset, joita SKYSHIELD käyttää sisältyvät Forecast Internationalin ennusteeseen. Niiden ollessa kehittyneitä ammuksia, on oletettavissa, että ne ovat annetun vaihteluvälin yläpäässä. Täten voidaan arvioida ZU-23-2:n ammusten maksavan noin 2\$ kappaleelta ja SKYSHIELD:n ammusten noin 25\$ kappaleelta. Tutkijan oman käsityksen mukaan nämä arvot ovat alimitoitettuja, mutta keskinäiseltä hintasuhteeltaan oikeansuuntaisia. CIA:n arvion mukaan Iglan yksikköhinta on noin 60000-80000\$ alkuperäiseltä valmistajalta [31].

Elektronisen vaikuttamisen aseilla lennokin tuhoamiseen vaadittavan energian kustannukset ovat jokseenkin seuraavat. LaWS järjestelmällä yhden tuhoavan laukauksen ampuminen maksaa noin 1\$ [60]. PHASER-järjestelmän voitaneen olettaa olevan käyttökustannuksiltaan samaa luokkaa, sillä se käyttää järjestelmänsä käyttämiseen pelkästään sähköä.

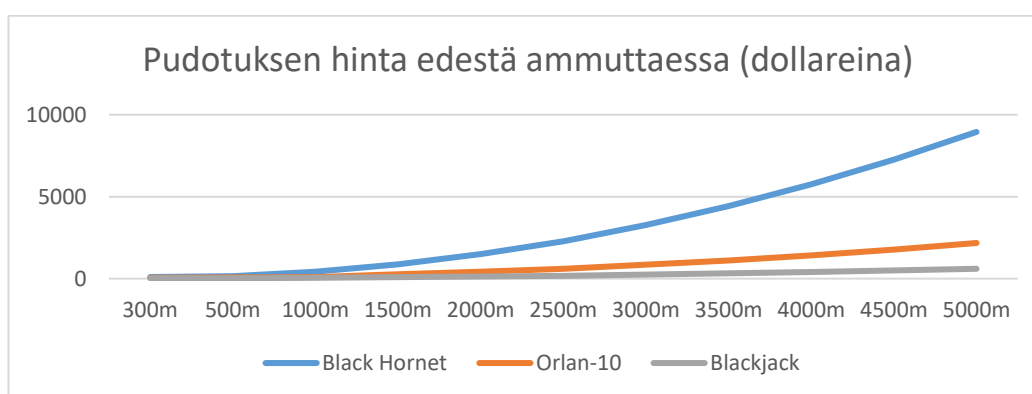
Käyttämällä edellä esitettyjä arvioita järjestelmien käyttökustannuksia, voidaan arvioida lennokkien tuhoamiseen kuluva kustannuksia. Lennokin pudottamisen kustannukset ampumaetäisyyden funktiona on esitetty kuvissa 5, 6, 7, 8, 9 ja 10.



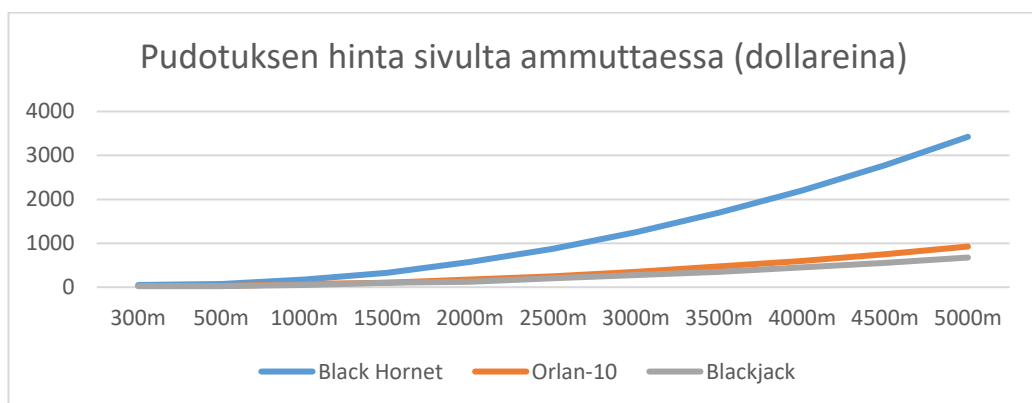
Kuva 5. ZU-23-2:n kustannukset lennokin pudottamiseen ammuttaessa edestä.



Kuva 6. ZU-23-2:n kustannukset lennokin pudottamiseen ammuttaessa sivulta.

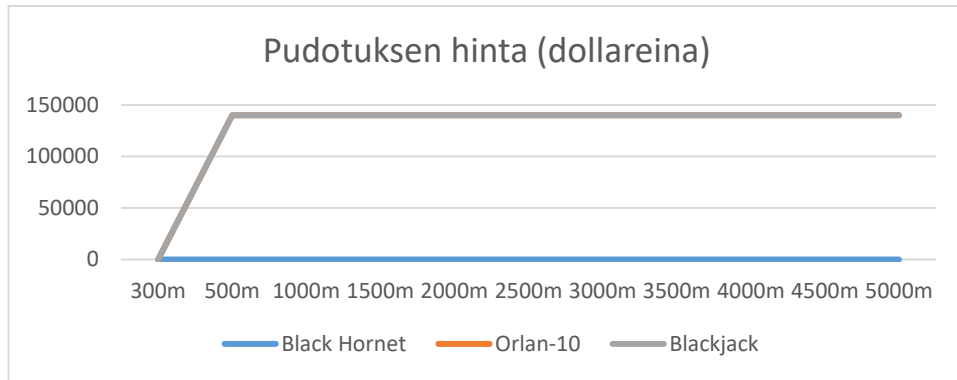


Kuva 7. Skyshield:n kustannukset lennokin pudottamiseen ammuttaessa edestä



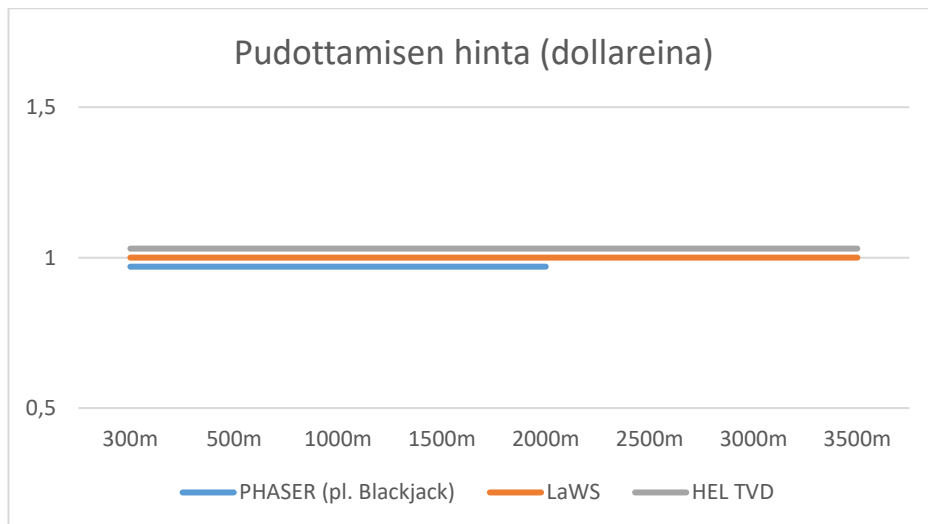
Kuva 8. Skyshield:n kustannukset lennokin pudottamiseen ammuttaessa sivulta

Iglan osalta pudotuksen hinta on tehokkaalla ampumaetäisyydellä vakio, ollen sama Orlan-10:ntä ja Blackjack:ia vastaan.



Kuva 9. Iglan kustannukset lennokin pudottamiseen

Sähkömagneettisen vaikuttamisen aseet ovat pudotukseen vaadittavilta kustannuksiltaan käytännössä mitättömät.



Kuva 10. Sähkömagneettisen vaikuttamisen järjestelmien kustannukset lennokin pudottamiseen

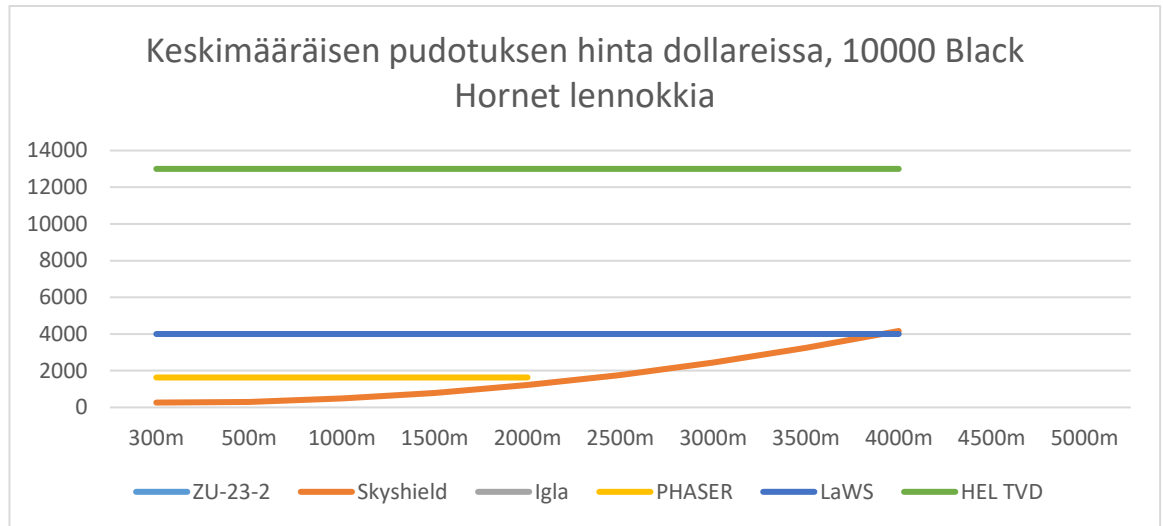
Tutkittujen järjestelmien hinnat ovat jokseenkin seuraavat. ZU-23-2:n hinta Afrikassa vaihtelee noin 20000-70000 \$ välillä, joten arvioidaan aseiden hinnaksi näiden keskiarvona 45000 \$ [61; 62]. Skyshield on paljon kehittyneempi ja kalliimpi järjestelmä. Tukholman rauhaninstituutin Indonesia on tilannut yhteensä 12 Skyshield järjestelmää, joista toinen jatkotilaus koski kahta järjestelmää 2014 [63]. Rheinmetall:n oman uutisen mukaan helmikuussa 2014 annettu tilaus oli arvoltaan 38 miljoonaa dollaria [64]. Bundeswehr tilasi puolestaan 2007 kaksi järjestelmää 64 miljoonan dollarin hintaan [27]. Yhden täyden järjestelmän koostuessa kuudesta tykistä, kahdesta tutkasta, komentopaikasta ja kunnossapitokonsolista [27], arvioidaan yhden tykin hintaa olettamalla jokaisen osajärjestelmän olevan yhtä kallis. Tällöin yhden aseiden hinnaksi saadaan noin 1,9 miljoonaa dollaria, käyttäen Indonesian tilauksen hintaa. Iglan yksikköhinta on CIA:n arvion mukaan valmistajalta tilattuna noin 60000 - 80000\$ [31], joten tutkimuksessa käytetään niiden keskiarvoa 70000\$ laukausta kohden. Yhdysvaltain puolustusministeriö myönsi syyskuussa 2019 noin 16,3 miljoonaa dollaria yhden PHASER-järjestelmän prototyypin tuottamiseksi [65]. LaWS järjestelmä on yksikköhinnaltaan noin 40 miljoonaa dollaria [66]. Yhdysvallat myönsi HEL TVD prototyypin tuottamiseksi Dynetics-Lockheed:lle 130 miljoonaa dollaria [48].

Tarkasteltujen asejärjestelmien yksikköhinnat kattavat varsin laajan skaalan, muutamista kymmenistä tuhansista aina kymmeneen miljooniin dollareihin saakka. Mikäli järjestelmää käytetään vain yhden lennokin torjuntaan sen elinaikana, muodostuu järjestelmien kustannustehokkuus käytännössä järjestelmän hinnan mukaan. Tällöin ZU-23-2 olisi kaikista halvin ratkaisu tehokkaan ampumaetäisyytensä 0-3000m sisällä kaikkia tutkittuja maaleja vastaan. Vaikka järjestelmä olisi tällä tavoin halvin käyttää, ei se käytännössä ole mahdollista, sillä ZU-23-2 vaatii onnistuakseen huomattavan määrän ampumatarvikkeita, sillä suuren hajonnan johdosta aseiden toiminta perustuu suureen tulen tiheyteen [24, s.270-272]. Tarkasteltaessa järjestelmien kustannustehokkuutta, pidetään rajoittavana tekijänä yhden aseiden ammustäyttöä. Mikäli järjestelmä ei kykene omalla ammustäytöllään torjumaan lennokkia tietyllä ampumaetäisyydelle, voidaan sen tulen tehoa pitää käytännössä tehottomana. Igla-ilmatorjuntaohjukselle rajoittavana tekijänä pidetään laskettua kahden ohjuksen vaatimusta yli 50% tuhoamistodennäköisyyden saavuttamiseksi, sillä järjestelmä annettujen tietojen perusteella jää muutaman prosentin vaaditusta tavoitteesta. Ammusaseiden osalta tehokkaan vaikutuksen etäisyydeksi lasketaan edestä ja sivulta ammuttaessa saatavien tehokkaiden ampumaetäisyyksien keskiarvo, pyöristäen alaspäin. Pudotettavien lennokkien määräksi valittiin 1-1000 järjestelmien keskinäisten erojen esiintuomiseksi. Lisäksi havainnoitiin 10000 lennokin pudottamista uusien asejärjestelmien etujen esiintuomiseksi. Nämä rajoitukset huomioiden voidaan aseiden keskinäistä tehokkuutta arvioida seuraavasti.

Ammuttaessa kaikista pienintä tarkasteltua lennokkia Black Hornet:ia, saavuttaa Skyshield pienimmän keskimääräisen pudotuksen hinnan kaikilla ampumaetäisyyksillä, pudotettavien lennokkien määrän ollessa 1-1000 lennokkia, kuten kuvassa 11 on esitetty. Useat tarkastelluista järjestelmistä eivät joko luotettavasti kykene vaikuttamaan näin pientä lennokkia vastaan tai niiden hankintahinta muodostuu kustannustehokkuuden esteeksi. Vasta pudotettavien lennokkien määrän nostaminen 10000:een tuo PHASER ja LaWS -järjestelmät kilpailukykyisiksi Skyshield:ia vastaan äärikantamilleen, kuten kuvasta 12 nähdään.

1 lennokkia												10 lennokkia											
Black Hornet												Black Hornet											
AMET	300m	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m	4500m	5000m	AMET	300m	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m	4500m	5000m
ZU-23-2												ZU-23-2											
Skyshield	1900075	1900113	1900300	1900600	1901038	1901575	1902263	1903063	1903975			Skyshield	190075	190112,5	190300	190600	191037,5	191575	192262,5	193062,5	193975		
Igla												Igla											
PHASER	1630001	1630001	1630001	1630001	1630001	4000001	4000001	4000001	4000001			PHASER	1630001	1630001	1630001	1630001	1630001	4000001	4000001	4000001	4000001		
LaWS	4000001	4000001	4000001	4000001	4000001	4000001	4000001	4000001	4000001			LaWS	4000001	4000001	4000001	4000001	4000001	4000001	4000001	4000001	4000001		
HEL TVD	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08			HEL TVD	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001		
100 lennokkia												1000 lennokkia											
Black Hornet												Black Hornet											
AMET	300m	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m	4500m	5000m	AMET	300m	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m	4500m	5000m
ZU-23-2												ZU-23-2											
Skyshield	19075	19112,5	19300	19600	20037,5	20575	21262,5	22062,5	22975			Skyshield	1975	2012,5	2200	2500	2937,5	3475	4162,5	4962,5	5875		
Igla												Igla											
PHASER	163001	163001	163001	163001	163001	40001	40001	40001	40001			PHASER	16301	16301	16301	16301	16301	40001	40001	40001	40001		
LaWS	400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001			LaWS	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001		
HEL TVD	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001			HEL TVD	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001		

Kuva 11. Keskimääräisen pudotuksen hinta dollareina Black Hornettia vastaan eri järjestelmillä.

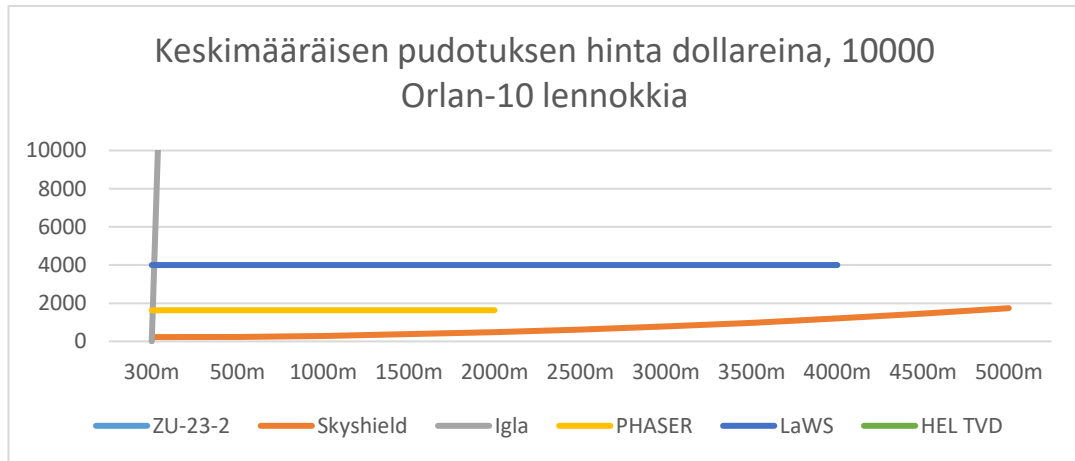


Kuva 12. Keskimääräisen pudotuksen hinta ammuttaessa 10000 Black Hornet lennokkia

Ammuttaessa toiseksi pienintä tarkastelua lennokkia, Orlan-10:ntä, tulokset ovat mielenkiintoisempia, sillä useammalla järjestelmällä on kyky vaikuttaa maaliin. ZU-23-2 olisi on halvin ratkaisu lennokin pudottamiseen, mutta yksittäisen asejärjestelmän ampumatarviketäyttö on kulutettu ennen vaaditun 50% tuhoamistodennäköisyyden täyttymistä. Ampumaetäisyydellä 1000-5000m Igla on halvin vaihtoehto kymmeneen pudotettuun lennokkiin saakka, pudotuksen hinnan ollessa 140000 dollaria. Skyshield:n pudotuksen hinta on kymmenellä lennokilla noin 190000 dollaria, mutta siirryttäessä sataan pudotettuun lennokkiin on se halvin vaihtoehto kaikille ampumaetäisyyksille. Sadalla lennokilla pudotuksen hinta on noin 19000-20000 dollaria ja tuhannella 1940-3500 dollaria, joka on esitetty kuvassa 13. Vaikka pudotettavien lennokkien lukumäärää kasvatettaisiin kymmeneen tuhanteen, eivät elektronisen vaikuttamisen järjestelmät kykene kilpailemaan fyysiseen vaikutukseen perustuvien järjestelmien kanssa, kuten kuvasta 14 nähdään.

1 lennokki												10 lennokkia											
Orlan-10	edestä ja sivulta keskiarvo											Orlan-10	edestä ja sivulta keskiarvo										
AMET	300m	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m	4500m	5000m	AMET	300m	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m	4500m	5000m
ZU-23-2												ZU-23-2											
Skyshield	1900038	1900050	1900088	1900188	1900300	1900425	1900600	1900788	1901013	1901263	1901550	Skyshield	190037,5	190050	190087,5	190187,5	190300	190425	190600	190787,5	191012,5	191262,5	191550
Igla	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	Igla	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000
PHASER	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	PHASER	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001
LaWS	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	LaWS	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001
HEL TVD	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	HEL TVD	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001
100 lennokkia												1000 lennokkia											
Orlan-10	edestä ja sivulta keskiarvo											Orlan-10	edestä ja sivulta keskiarvo										
AMET	300m	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m	4500m	5000m	AMET	300m	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m	4500m	5000m
ZU-23-2												ZU-23-2											
Skyshield	19037,5	19050	19087,5	19187,5	19300	19425	19600	19787,5	20012,5	20262,5	20550	Skyshield	1937,5	1950	1987,5	2087,5	2200	2325	2500	2687,5	2912,5	3162,5	3450
Igla	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	Igla	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000
PHASER	163001	163001	163001	163001	163001	163001	163001	163001	163001	163001	163001	PHASER	16301	16301	16301	16301	16301	16301	16301	16301	16301	16301	16301
LaWS	400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001	LaWS	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001
HEL TVD	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	HEL TVD	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001

Kuva 13. Keskimääräisen pudotuksen hinta dollareina Orlan-10 vastaan eri järjestelmillä.



Kuva 14. Keskimääräisen pudotuksen hinta 10000 pudotetulla Orlan-10 lennokka

Viimeinen ja suurin tarkastelluista lennokeista on Blackjack. 300m sisällä ZU-23-2 on halvin vaihtoehto 1-1000 torjutun lennokin vaihteluvälin sisällä kuten kuvasta 15 selviää. Igla on halvin vaihtoehto 500-5000m ampumaetäisyyksille kymmeneen torjuttuun lennokkiin saakka. Saatuaan torjuttuun lennokkiin siirryttäessä Skyshield on selvästi halvin vaihtoehto tälle ampumaetäisyydelle, pudotuksen hinnan ollessa noin 2000 - 19000 dollaria 100-1000 torjutun lennokin sisällä. Edelleen kasvatettaessa torjuttujen lennokkien lukumäärää 10000:een, eivät elektronisen vaikuttamisen järjestelmät kykene kilpailemaan fyysiseen vaikutukseen perustuvien järjestelmien kanssa. Tämä on esitetty kuvassa 16.

Blackjack											10 lennokkia										
1 lennokka											10 lennokkia										
Blackjack											Blackjack										
AMET											AMET										
ZU-23-2											ZU-23-2										
Skyshield											Skyshield										
Igla											Igla										
PHASER											PHASER										
LaWS											LaWS										
HEL TVD											HEL TVD										
100 lennokkia											1000 lennokkia										
Blackjack											Blackjack										
AMET											AMET										
ZU-23-2											ZU-23-2										
Skyshield											Skyshield										
Igla											Igla										
PHASER											PHASER										
LaWS											LaWS										
HEL TVD											HEL TVD										
300m	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m	4500m	5000m	300m	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m	4500m	5000m
4597											4597										
1900025	1900025	1900050	1900100	1900125	1900188	1900263	1900338	1900425	1900525	1900638	190025	190025	190050	190100	190125	190187,5	190262,5	190337,5	190425	190525	190637,5
140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000
16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001	16300001
40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001	40000001
1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	1,3E+08	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001	13000001
547											142										
19025	19025	19050	19100	19125	19187,5	19262,5	19337,5	19425	19525	19637,5	1925	1925	1950	2000	2025	2087,5	2162,5	2237,5	2325	2425	2537,5
140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000	140000
163001	163001	163001	163001	163001	163001	163001	163001	163001	163001	163001	16301	16301	16301	16301	16301	16301	16301	16301	16301	16301	16301
400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001	400001	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001	40001
1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	1300001	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001	130001

Kuva 15. Keskimääräisen pudotuksen hinta dollareina Blackjack vastaan eri järjestelmillä.

Tarkasteltaessa käsiteltyjä järjestelmiä pudotettujen lennokkien määrän ja ampumaetäisyyden mukaan saadaan seuraavat taulukkot 23,24 ja 25, jossa ilmaistaan halvin järjestelmä lennokin pudottamiseksi.

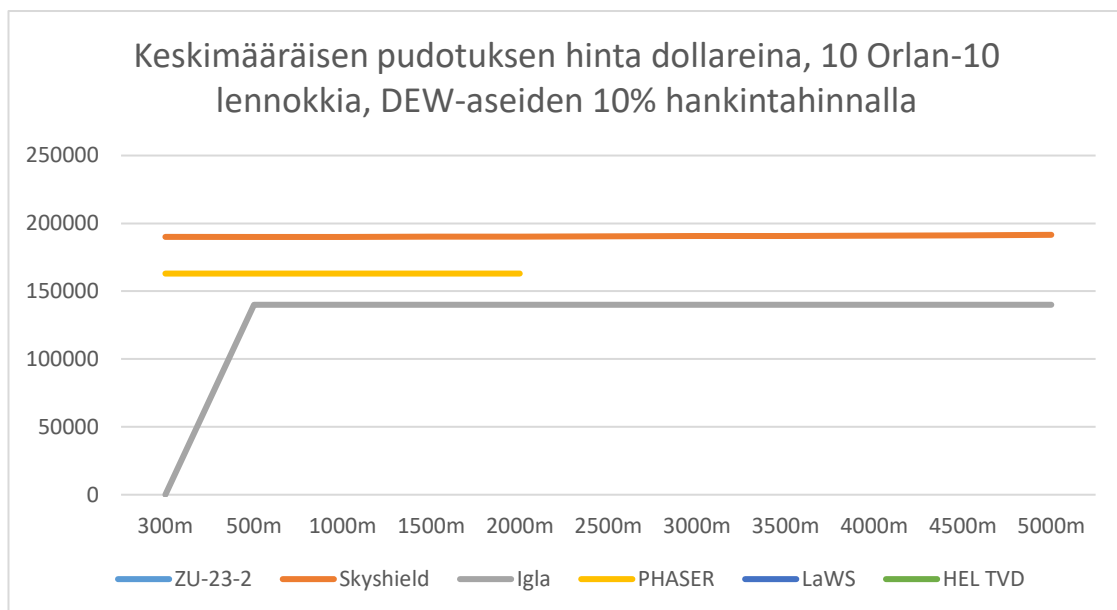
[illegible][illegible]

Taulukko 25. Halvin ilmatorjuntajärjestelmä pudotettavien Black Hornet lennokkien määrän mukaan.

Len- nokeja	300m	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m	4500m	5000m
¹	ZU-23-2	Igla	Igla	Igla	Igla	Igla	Igla	Igla	Igla	Igla	Igla
¹⁰	ZU-23-2	Igla	Igla	Igla	Igla	Igla	Igla	Igla	Igla	Igla	Igla
¹⁰⁰	ZU-23-2	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield
¹⁰⁰⁰	ZU-23-2	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield	Skysh ield

Näitä taulukkoja vertaamalla on selvää että pienimpiä lennokkeja vastaan ainut kustannustehokas järjestelmä on Skyshield. Igla on kustannustehokkain 10:een pudotettuun lennokkiin saakka Orlan-10 ja Blackjack lennokkeja vastaan 500-5000m ampumaetäisyyksille. Skyshield on kustannustehokkain järjestelmä suuremmille lennokkimäärille kaikilla ampumaetäisyyksillä. ZU-23-2 on kustannustehokkain suurimpia lennokkeja vastaan erityisen lyhyille 300m ampumaetäisyyksille.

Sähkömagneettisen vaikuttamisen aseiden kustannustehokkuuden esteeksi muodostuu niiden suuri hankintahinta. Mikäli näiden järjestelmien hankintahinta saadaan pudotettua yhteen kymmenesosaan, on PHASER kustannustehokkain järjestelmä tehokkaalla ampumaetäisyydellään jo yksittäisiä Black Hornetin kokoluokan lennokkeja vastaan. Orlan-10:n ja Blackjack:n kokoisten lennokkien kanssa PHASER kykenisi olemaan kilpailukykyinen tehokkaalla ampumaetäisyydellään Igla:a vastaan kymmentä pudotettua lennokkia kohden, keskimääräisen pudotuksen maksaessa noin 16% enemmän. Laserjärjestelmien pudotushinta on noin 2,5-8 kertainen PHASER-järjestelmään verrattuna. Tämä on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Keskimääräisen pudotuksen hinta pudotettaessa 10 Orlan-10 lennokkia, DEW-aseiden 10% hankintahinnalla

5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1. Tulokset

Tutkimuksen päätutkimuskysymys on: ”Miten pieniä sotilaslennokkeja voidaan torjua kustannustehokkaasti?” Apukysymyksiä ovat:

1. ”Millaisia pienet sotilaslennokit ovat?”
2. ”Miten lennokkeja voidaan torjua?”
3. ”Mitä on kustannustehokkuus lennökkien torjunnassa?”

Ensimmäiseen apukysymyksen osalta todettiin, että ensimmäinen ongelma pienten lennökkien tarkastelussa on niiden määritelmä. Maailmalla on käytössä useita toistensa kanssa ristiriitaisia määrittelymenetelmiä lennökkien luokitteluun. Osa käytetyistä luokittelumenetelmistä pyrkii luokitteluun lennokit lain mukaan, eli mitä asioita tietyn kokoisella lennokilla saa tehdä ja missä olosuhteissa. Toiset luokittelevat lennokit niiden sotilaallisen käytön mukaan. Tutkimuksessa päädyttiin käyttämään NATO:n lennökkiluokitusta pienistä lennokeista, eli lennokkeja joiden lentoonlähöpaino on alle 150kg. Lennokit ovat miehittämättömiä kiinteä- tai pyöreäsiipisiä ilma-aluksia, jotka kuljettavat mukanaan kaikki lennon aikana tarvitsemansa osajärjestelmät. Lentoon tarvittava voima tuotetaan joko polttomootorilla tai akulla. Lennokin tarkoituksena on kantaa hyötykuorma, eli ne laitteet joilla lennokin lennättämiselle saadaan tuotettua lisäarvoa, kohdealueelle. Sotilaallisissa viitekehyksessä hyötykuormaa ovat usein erilaiset sensorit tai asejärjestelmät. Lennokin saattamiseksi kohdealueelle käytetään joko ohjelmoitua lentoreittiä tai datalinkkiä, joka mahdollistaa kahdensuuntaisen tietoliikenteen. Datalinkkiä hyödynnetään myös sensorien tuottaman datan välittämiseen maa-asemalle. Esimerkkijärjestelmiksi valittiin kolme lennokkia niiden lentoonlähöpainon perusteella. Nämä kolme lennokkia olivat Black Hornet 3, Orlan-10 ja Blackjack. Esimerkkijärjestelmien lentoonlähöpaino vaihteli 33 grammasta 62 kilogrammaan. Näiden järjestelmien hyötykuormana oli erilaisia sensoreita, lähtökohtaisesti päiväkamera sekä lämpökamera. Aikaisemmin mainittujen osajärjestelmien lisäksi lennökkijärjestelmään kuuluu navigointi-, laukaisu- ja laskeutumisjärjestelmä, sekä maa-asema.

Toiseen apututkimuskysymykseen ”Miten lennokkeja voidaan torjua?” vastattiin kolmannessa pääluvussa. Käyttäen toisen pääluvun lopussa ollutta haavoittuvuusanalyysia, päädyttiin tarkastelemaan kineettiseen ja sähkömagneettiseen vaikuttamiseen perustuvia järjestelmiä. Kineettisen vaikuttamisen järjestelmiin luettiin ammus- ja ohjusilmatorjunta. Sähkömagneettisen vaikuttamisen järjestelmiin luettiin korkeatehoinen mikroaaltoase sekä korkeateholaserit. Jokaisesta asejärjestelmästä käytettiin yhtä tai kahta esimerkkijärjestelmää, joiden perusteella niiden tehokkuutta arvioitiin esimerkkeinä olleita lennokkeja vastaan.

Ammusilmatorjunnan asejärjestelmillä merkittävässä osassa on maalin havaitsemisen jälkeen ennakon määrittäminen, aseiden suuntaaminen sekä oikean laukaisuhetken määrittäminen. Tarvittavat ampuma-arvot muodostetaan laskimella. Tutkimuksessa ei käsitelty näiden ampuma-arvojen tai maalin havaitsemista yksityiskohtaisesti, kummallekin tutkitulle järjestelmälle oletettiin ns. täydellinen tilannetieto ja olosuhteet, jolloin kyettiin tarkastelemaan järjestelmien maksimaalista suorituskykyä. Tutkituiden järjestelmien, ZU-23-2:n ja Skyshield:n, suurimmat erot johtuivat niiden käyttämisestä ammustarvikkeista ja tarkkuudesta. ZU-23-2 on tarkoituksella epätarkka järjestelmä, joka on kehitetty 50-luvulla Neuvostoliitossa. Epätarkkuuden tarkoituksena on mitätöidä suuntauksessa, ennakonmäärittämisessä ja muista tekijöistä johtuvia virheitä, jolloin ampujalle riittää, että ase on suunnattu jokseenkin oikeaan pisteeseen. Tätä epätarkkuutta on kompensoitu suurella tulinopeudella ja laukausmäärillä. Skyshield on puolestaan 90-luvulla kehitetty järjestelmä ja huomattavasti ZU-23-2:tä tarkempi. Järjestelmän tehokkuus perustuu sen ampumatarvikkeiden toimintaan. Skyshield käyttää 35mm:n AHEAD-ammuksia, jotka ohjelmoidaan ammuksen putkivaiheen aikana räjähtämään 10-40m ennen kohdetta, saadun etäisyydestä perusteella. Jokainen kranaatti sisältää 152 volframi sylinteriä, jotka levitetään pienellä panoksella noin 10 asteen kulmassa ennen maalia, jolloin tehokas vaikutuspinta-ala kasvaa. Ammuksen ei siis tarvitse osua suoraan kohteeseen aiheuttaakseen vahinkoa, vaan sen on osuttava vain riittävän lähelle. Ammuskulutuksessa aseiden ero oli merkittävä, ZU-23-2 tarvitsi tuhansia laukauksia kaikista pienintä lennokkia ja satoja suurinta vastaan jo 1000m ampumaetäisyydellä. Skyshield järjestelmä kulutti puolestaan yli sata ammusta vain pienintä maalia vastaan yli 2500m ampumaetäisyydelle, selviten vain kymmenillä suurempia lennokkeja vastaan 5000m saakka.

Ohjusilmatorjunnalla saavutetaan jokseenkin vakio tuhoamistodennäköisyys aseiden tehokkaalla ampumaetäisyydellä. Tämä johtuu ohjuksen omasta kyvystä hakeutua havaitsemaansa maaliin laukaisun jälkeen. Niitä kyetään yleensä pitämään korkeassa valmiudessa kuitenkin lyhyemmän aikaa kuin ammusilmatorjunnan aseita. Sääolosuhteet vaikuttavat passiivisesti hakeutuvan ohjuksen toimintaan. Esimerkkijärjestelmänä käytetty Igla, Neuvostoliitossa 80-luvulla käyttöön otettu ilmatorjuntaohjus, käyttää maaliin hakeutumiseen sen lähettämää lämpösäteilyä. Selvitettyjen tietojen perusteella vaaditaan noin 2 ohjusta yli 50% tuhoamistodennäköisyyden saavuttamiseksi Orlan-10 ja Blackjack lennokkeja vastaan. Ohjuksen lukittumista Black Hornet lennokkiin pidettiin epätodennäköisenä lennokin vaatimattoman lämpösäteilyn ja pienen koon vuoksi.

Sähkömagneettiseen vaikuttamiseen perustuvista järjestelmistä tutkittiin PHASER-mikroaaltoasetta sekä LaWS ja HEL TVD -laseraseita. Sähkömagneettiseen vaikuttamisen perustana on suuritehoinen sähkömagneettinen säteily. Vaikutus maalissa perustuu joko sen elektroniikan rikkomiseen tai sen rakenteiden tuhoamiseen lämpövaikutuksella tai mekaanisella rasituksella. Näiden järjestelmien etuina on lähes välitön vaikutus maalissa, alhaiset käyttökustannukset sekä kyky torjua useita maaleja lyhyessä ajassa. Järjestelmät ovat kuitenkin vielä kalliita tuottaa. Ne vaativat myös näköyhteysreitin ja ilmakehän ominaisuudet voivat heikentää aseiden tehoa. Mikroaaltoaset tuhoavat kohteen elektroniikan voimakkaalla sähkömagneettisella pulsilla. Vaikutus johdetaan kohteeseen joko suoran tai epäsuoran tunkeutumisen kautta. PHASER-järjestelmän tehokkaaksi etäisyydeksi arvioitiin noin 2km Black Hornet ja Orlan-10 lennokkeja vastaan. Blackjack:n kokoisia lennokkeja ei ole käytetty järjestelmän testeissä, joten vaikutus sitä vastaan on epävarmaa. Laseraseilla pyritään tuhoamaan kohteen sensorit tai kohde itse suuritehoisella säteilyllä, joka lämmittää kohdetta. Esimerkkijärjestelminä käytettiin LaWS sekä HEL TVD -laseraseita. Näistä LaWS on operatiivisessa käytössä ja HEL TVD suunnitelluusteella. Asejärjestelmien teho riittää sensoreiden vaurioittamiseen yli 5km etäisyydelle. Tutkittujen laseraseiden suorituskyky oli varsin samankaltainen. 1mm paksun alumiinilevyn puhkaisuun kolmessa sekunnissa vaadittava energia kyettiin kohdistamaan 4000m saakka.

Kolmanteen tutkimuskysymykseen ”Mitä on kustannustehokkuus lennokkien torjunnassa?” vastattiin neljännessä pääluvussa. Asejärjestelmien hinnan jatkuva kasvu luo painetta kehittää ja hankkia järjestelmiä joiden käyttökustannukset ovat pienet. Näiden järjestelmien tulisi myös olla monikäyttöisiä sekä sisältää keskenään vaihdettavia komponentteja. Kustannustehokkuutta tarkasteltaessa on mietittävä järjestelmän elinjakso-kustannuksia, jotka sisältävät kaikki ne kustannukset joita järjestelmä tuottaa hankinnan suunnittelusta purkamiseensa saakka. Tutkimuksessa kustannustehokkuutta tutkittiin käyttökustannusten sekä käyttö- ja hankintakustannusten mukaan.

Fyysiseen vaikutukseen perustuvien järjestelmien hankintakustannukset ovat sähkömagneettiseen vaikuttamiseen perustuvia järjestelmiä halvempia. Sähkömagneettiseen vaikutukseen perustuvat järjestelmät ovat kuitenkin käyttökustannuksiltaan käytännössä mitättömät. Kaikkia tarkasteluja lennokkeja vastaan sähkömagneettisen vaikuttamisen järjestelmät olivat käyttökustannuksiltaan ylivoimaisesti pienimmät. Näiden kantaman ulkopuolella Skyshield oli kustannuksiltaan pienin. Laskettaessa mukaan järjestelmien hankintahinta ja vertailtaessa useampia pudotettuja lennokkeja vastaan, muodostui selvä kuvio. Igla on halvin vaihtoehto kymmeneen pudotettuun lennokkiin saakka Orlan-10 ja Blackjack lennokkeja vastaan 500-5000m ampumaetäisyyksille. Skyshield on muutoin halvin vaihtoehto kaikkia maaleja vastaan kaikille ampu-maetaisyyksille, pois luettuna 300m ampumaetaisyys Blackjackia vastaan, jolloin ZU-23-2 on halvin kaikille lennokkien määrille. Jotta sähkömagneettisen vaikuttamisen aseet olisivat kilpailukykyisiä fyysiseen vaikutukseen perustuvien järjestelmien kanssa, olisi niiden hankintakustannusten pudottavan noin kymmenesosaan. Tällöin ne olisivat kustannustehokkaimpia pienimpiä lennokkeja vastaan tehokkaalla ampumaetaisyydellään, sekä kilpailukykyisiä suurempia lennokkeja vastaan jo 10 torjutun lennokin kohdalla.

Päätutkimuskysymyksen ”Miten pieniä sotilaslennokkeja voidaan torjua kustannustehokkaasti?” vastauksen voidaan todeta olevan riippuvainen järjestelmän elinaikanaan pudottamien lennokkien määrästä. Kaikista pienimpiä lennokkeja vastaan kaikille ampumaetaisyyksille kustannustehokkainta on käyttää edistyneitä ammusasejärjestelmiä. Muita pieniä lennokkeja vastaan on kymmeneen pudotukseen saakka tehokkainta käyttää olalta laukaistavia ilmatorjunta-ohjuksia ja sitä suuremmille pudotusmäärille kehittyneitä ammusasejärjestelmiä. Sähkömagneettiseen vaikuttamiseen perustuvat järjestelmät muodostuvat kustannustehokkaiksi niiden hankintakustannusten pudotessa noin kymmenesosaan. Niiden etuna voidaan myös pitää useiden lennokkien torjuntaa yhtäaikaaisesti tai lyhyellä aikajaksolla.

5.2. Luotettavuus

Tutkimuksessa käytettyjä matemaattisia perusteita voidaan pitää varsin tarkkoina. ZU-23-2:n mallinukseen käytettiin verrattain yksinkertaista menetelmää, jota voidaan pitää luotettavan. Virhelähteen muodostaa kuitenkin ammuttujen laukausten oletettu normaalijakauma, joka ei täysin vastaa todellisuutta. Mallinnettaessa Skyshield-järjestelmää käytettiin tutkijan itse kehittämää menetelmää, joka ei täysin vastaa todellisuutta. AHEAD-ammusten tehokkuutta mallinnettaessa havaittiin tunnistettuja virhelähteitä. Ensimmäisenä, ammusten aiheuttamaa sirpaleviuhkaa ei kuvattu poikkileikkaukseltaan ympyränä vaan vastaavan pinta-alan omaavana neliönä. ”Täyspeittoja” tarkasteltaessa ei otettu huomioon sitä kuinka paljon muista maalielementeistä peittyi sirpaleviuhkan alle, jos ne eivät peittäneet maalielementtiä niin paljon kuin ne kykenivät. ”Osittaisia peittoja” kuvaava tehokkuuskerroin ei myöskään realistisesti kuvaa niiden todellista tehokkuutta, sillä laukaukset eivät oikeasti jakaudu tasaisesti tämän vaihteluvälin sisällä. Mallissa laukausten jakauma oletettiin normaalijakauman mukaiseksi, jolloin osumat lähelle maalin keskipistettä olisivat todennäköisimpiä. Tarkoituksena oli mahdollisuuksien mukaan pyrkiä aliarvioimaan järjestelmän suorituskykyä tunnistettujen virhelähteiden kohdalla, jolloin järjestelmän suorituskyky ei tulisi yliarvioituksi. Lopullisissa tuloksissa, joissa huomioitiin järjestelmien hankintakustannukset, oli Skyshield kertaluokan halvempi kuin muut järjestelmät, silloin kuin se oli kustannustehokkain järjestelmä. Vastaavasti pelkkiä käyttökustannuksia arvioitaessa olisi vaikutukseen vaadittavan laukaussuorituksen kohottava ampumaetäisyydestä riippuen noin 3-15 kertaiseksi, jotta se olisi ZU-23-2:hta kalliimpi. On epätodennäköistä näin suurta virhelähdettä esiintyisi asejärjestelmän eduksi, ottaen huomioon, että havaitut virheet pyrittiin laskemaan järjestelmälle epäedullisesti.

Arvioitaessa Igla:n lukittumismahdollisuutta maaliin, ei saatuja tuloksia pystytty varmistamaan, sillä tieto Iglan hakupään herkkyydestä puuttui. Tästä syystä tulokset ovat tutkijan oman arvion mukaisia. Myös esitetty tuhoamistodennäköisyys on arvio, sillä se on johdettu eri lähteistä saaduista tiedoista. Vaikka tutkimuksessa olisi käytetty esitetyn pudotustodennäköisyyden alarajaa 0,3 ohjusta kohden, ei tämä olisi vaikuttanut saatuihin tuloksiin, joissa lennokin pudottamiseen todettiin keskimääräisesti tarvittavan 2 ohjusta. Ohjuksen lukittuminen Black Hornet lennokkiin vaatii lisätutkimusta.

Sähkömagneettisen vaikuttamisen järjestelmien yksityiskohtiin on syytä suhtautua kriittisesti. Järjestelmät ovat pääsääntöisesti vielä kehityksessä ja niiden yksityiskohtia varjellaan tarkoin. Aseiden ilmoitetut tehokkaat vaikutusetäisyydet perustuvat valmistajien omiin ilmoituksiin ja uutisartikkeleihin. Näitä on syytä pitää arvioina todellisesta kantamasta, muistaen että valmistajalle on edullista liioitella aseidensa tehokkuutta. Tutkittujen tietojen perusteella jää PHASER-järjestelmän osalta epäselväksi sen tehokkuus NATO:n luokituksen I lennokkeja vastaan jotka painavat yli 25kg. Elektroniikkaa voidaan myös suojata sähkömagneettiselta säteilyltä. Tämänkaltaisen suojauksen tehokkuus PHASER-järjestelmää vastaan vaatii myös lisätutkimusta. Laseraseita tarkasteltaessa järjestelmien suorituskykyä yliarvioitiin, sillä kaikkia järjestelmän tehoa laskevia tekijöitä ei huomioitu, kuten lämmön johtuvuutta maalissa. Tutkimuksen lopputulokseen tällä ei ollut vaikutusta, sillä nämä aseet eivät muodostuneet kustannustehokkaimmiksi ratkaisuiksi.

Kustannustehokkuuden osalta järjestelmien hinnat on saatu johdettu joko valmistajien saamista sopimuksista tai uutislähteistä. Yksittäisten järjestelmien hintoja tutkija pitää varsin luotettavina, pois lukien ZU-23-2, jossa jouduttiin turvautumaan epäluotettavaan lähteeseen. Tutkija pitää todennäköisenä, että järjestelmän yksikköhinta aliarvioitiin. Tämä oli järjestelmän kannalta edullinen tilanne, mutta ei silti johtanut sen muodostumiseksi kustannustehokkaaksi järjestelmäksi, pois lukien äärimmäisen lyhyelle kantamalle. Ammusasejärjestelmien ammusten hintaa tutkija pitää aliarvioituna, vaikka käytetty lähde on jokseenkin luotettava. Tutkijan oman näkemyksen mukaan näiden tulisi olla noin 5-10 käytettyjä arvoja kalliimpia. Tutkimuksen lopputuloksen kannalta tällä ei kuitenkaan ollut merkitystä, sillä kustannustehokkuus muodostui lähinnä järjestelmän hankintahinnan mukaan. Ammusten hinnan kymmenkertaistaminen ei myöskään vaikuttaisi järjestelmien keskinäisiin sijoituksiin käyttökustannuksissa.

5.3. Jatkotutkimuksen mahdollisuus

Tutkimuksen lopputulosten suhteen erityistä mielenkiintoa herättää sähkömagneettisen vaikuttamisen järjestelmien hintakehitys tulevaisuudessa järjestelmien siirtyessä sarjatuotantoon. Mikäli näiden järjestelmien hankintakustannukset putoavat noin kymmenesosaan, voivat ne muodostua kaikkein kustannustehokkaimmiksi järjestelmiksi muutamien kilometrien torjuntaetäisyyksillä. Toinen mielenkiintoinen jatkotutkimusaihe on jo olemassa olevien asejärjestelmien päivittäminen käyttämään AHEAD-ammuksia. Mikäli tämänkaltaisen päivitys on mahdollista, voidaan jo olemassa olevien järjestelmien kustannustehokkuutta parantaa, mikäli päivitys itsessään ei osoittaudu erittäin kalliiksi. Taktiikan osalta tutkimuksen arvoista voisi olla elektromagneettisen vaikuttamisen järjestelmien tai AHEAD-ammuksia käyttävän ammusasejärjestelmän taktinen käyttö liikesodankäynnissä.

LÄHTEET

- [1] Kosola, J., & Solante, T. *Digitaalinen taistelukenttä - informaatioajan sotakoneen tekniikka*. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitoksen julkaisusarja 1. Verkkopainos. 2013. 491 s. ISBN 978-951-25-2503-4
- [2] Thomenius, P. *Ilmatorjunnan ampumaopin käsikirja*. Maavoimien esikunta, 2017. 175 s. ISBN 978-951-25-2777-9
- [3] Liakka, A. *Lennoikkien torjuntamahdollisuudet ITO05M sekä ITO15 -kalustoilla TSTOS(PA-JON) -taistelussa*. Kandidaatin tutkielma. 2015. Maanpuolustuskorkeakoulu.
- [4] Walters, D. *Countering the emerging small UAS threat: the case for a coherent Canadian counter-SUAS strategy*. Maisterintutkinto. 2016. Canadian Forces College. 124 s. saatavissa: <https://www.cfc.forces.gc.ca/259/290/318/286/walters.pdf>, viitattu 1.9.2019
- [5] Kratky, M. & Farlik, J. *Countering UAVs - the Mover of Research in Military Technology*, Defence Science Journal. 2018. vol 68 no.5. [viitattu 1.9.2019]. Saatavissa: <https://publications.drdo.gov.in/ojs/index.php/dsj/article/view/12442/6316>
- [6] Praisler, D. *COUNTER-UAV SOLUTIONS FOR THE JOINT FORCE*. 2017. Air War College, Air University. 32 s. [viitattu 7.4.2020]. saatavissa: <https://www.hsdl.org/?view&did=812443>
- [7] Austin, R. *Unmanned Aircraft Systems*. 1. Painos. West Sussex: Johan Wiley & Sons Ltd, 2010. 332 s. ISBN: 9780470058190
- [8] Fahlstrom, P. & Gleason, T. *Introduction to UAV Systems*. 4. Painos. West Sussex: Johan Wiley & Sons Ltd, 2012. 280 s. ISBN: 978-1-119-97866-4
- [9] Kosola, J., & Solante, T. *Digitaalinen taistelukenttä - informaatioajan sotakoneen tekniikka*. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitoksen julkaisusarja 1. 2. painos. 2003. 531 s. ISBN: 951-25-1449-4
- [10] Honkonen, J. *Maanpuolustuskorkeakoulun perustutkinto-osaston fysiikan oppikirja*, Maanpuolustuskorkeakoulun koulutuksen kehittämiskeskus, 1996. s. 305. ISBN: 951-25-0803-6
- [11] SIM-ma-Lt-014. Lentokelpoisuus- ja operointivaatimukset miehittämättömässä sotilasilmailussa, Sotilasilmailun viranomaisyksikkö, 13.10.2017

- [12] *U.S. ARMY Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2010-2035*. U.S. Army UAS Center of Excellence (ATSQ-CDI-C), Fort Rucker Alabama, 36362-5101 Saatavissa: <https://fas.org/irp/program/collect/uas-army.pdf>, viitattu 29.8.2019
- [13] *UAS TACTICAL POCKET GUIDE*. ATP-3.3.7.1. NATO STANDARDIZATION AGENCY, 2014. s. 74. Saatavissa: <https://www.uvsr.org/Documentatie%20UVS/Reglementari%20internationale/STANAG-uri/Stan-darde%20pt%20analiza%20UAV/STANAG/4670/ATP-3.3.7.1%20EDA%20V1%20E.pdf>
- [14] *Black Hornet 3*, Jane's IHS artikkeli. Posted 24.1.2020. [viitattu 30.8.2019] saatavissa: <https://janes.ihs.com/UnmannedAerial/Display/juavb006-juav>
- [15] *Black Hornet 3*, valmistajan esite. FLIR. [viitattu 30.8.2019] saatavissa: <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/black-hornet-prs-brochure-web.pdf>
- [16] *Black Hornet 3*, valmistajan esite. FLIR. [viitattu 30.8.2019] saatavissa: <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/black-hornet-prs-spec-sheet.pdf>, viitattu 30.8.2019
- [17] *Smaller is better: the increasing importance of nano-UAV technology*. Verkkoartikkeli. Defence & Security systems international. [viitattu 30.8.2019] saatavissa: <http://www.defence-and-security.com/features/featureminiature-drones-5711125/>
- [18] *Band Plan*, The national association for AMATEUR RADIO, ARRL. [viitattu 30.8.2019] saatavissa: <http://www.arrl.org/band-plan>
- [19] *STT Orlan*, Jane's IHS artikkeli. Posted 18.10.2019 [viitattu 31.8.2019] saatavissa: <https://janes.ihs.com/UnmannedAerial/Display/juava817-juav>
- [20] *Russian drone Orlan-10 consists of parts produced in the USA and other countries - photo evidence*, InformNapalm artikkeli. Posted 2.6.2018 [viitattu 31.8.2019] saatavissa: <https://informnapalm.org/en/russian-drone-orlan-10-consists-of-parts-produced-in-the-usa-and-other-countries-photo-evidence/>
- [21] *Insitu RQ-21A Blackjack*, IHS Jane's artikkeli. Posted 8.7.2019 [viitattu 31.8.2019] saatavissa: <https://janes.ihs.com/UnmannedAerial/Display/juava726-juav>
- [22] *RQ-21A Blackjack*, valmistajan esite. [viitattu 31.8.2019] saatavissa: https://www.insitu.com/images/uploads/pdfs/RQ-21ABlackjack_v2_ProductCard_PR120115.pdf

- [23] Kosola, J. & Jokinen, J. *Elektroninen sodankäynti osa 1 - taistelun viides dimension*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulun tekniikan laitos, julkaisusarja 5, 2004. s. 223 ISBN: 951-25-1554-7
- [24] *Yleinen ase- ja asejärjestelmäopas*. Puolustusvoimien koulutuksen kehittämiskeskus, 2001. ISBN 951-25-1277-7
- [25] Krstic, A., Lucas, M. & Wachsberger, C. *Limitations of Guns as a Defence against Manouvering Air Weapons*. Australian Government Department of Defence, Defence Science and Technology Organisation, Weapons Systems Division Systems Sciences Laboratory, 2004. Saatavissa: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a426717.pdf>
- [26] ZU-23-2, Jane's IHS artikkeli. Posted 30.11.2019 [viitattu 31.1.2020] Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/jlad0176-jaad>
- [27] *Skyshield*, Jane's IHS artikkeli. Posted 7.11.2019 [viitattu 1.2.2020] Saatavissa: <https://janes.ihs.com/ArtilleryAirDefence/Display/jlad0183-jaad>
- [28] Farradand, T. *Results of 35-mm Airburst Demonstration*. Army Research Laboratory, Weapons and Materials Research Directorate, Maryland. 2000, Saatavissa: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a372821.pdf>
- [29] *Todennäköisyys- ja ampumaopin perusteet*. Helsinki: Pääesikunta, 1984. s. 253. ISBN: 951-25-0310-7
- [30] *Igla family of MANPADS*. Jane's IHS artikkeli. Posted 29.10.2019 [viitattu 25.2.2020] saatavissa: <https://janes.ihs.com/ArtilleryAirDefence/Display/JLAD0019-JAAD>
- [31] *IGLA 9K38 / SA-18 / GROUSE SURFACE-TO-AIR MISSILE*. CIA:n tietopankki, [viitattu 25.3.2020] saatavissa: <https://www.cia.gov/library/abbottabad-compound/65/65B127CBF02A4667D8A8A229D6A5E87BIGLA.pdf>
- [32] *Malaysia army weapon systems handbook volume 1 Strategic information and weapon systems*. Washington DC: International Business Publications. 2011. ISBN: 1-4330-6180-5. Saatavissa: https://books.google.fi/books?id=NiuUcdJsHGkC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [33] *Russian Igla-S System Declared Lowest Bidder for Indian Army's VSHORAD Requirement*. Defpost verkkoartikkeli. Posted 19.11.2018 [viitattu 25.3.2020] saatavissa: <https://defpost.com/russian-igla-s-system-declared-lowest-bidder-for-indian-armys-vshorad-requirement/>

- [34] *9K388 Igla-S (SA-24 Grinch) Russian Man-Portable Air-Defense Missile System (MANPADS)*. ODIN Yhdysvaltain armeijan tietopankki. [viitattu 25.3.2020] saatavissa: [https://odin.tradoc.army.mil/mediawiki/index.php/9K388_Igla-S_\(SA-24_Grinch\)_Russian_Man-Portable_Air-Defense_Missile_System_\(MANPADS\)](https://odin.tradoc.army.mil/mediawiki/index.php/9K388_Igla-S_(SA-24_Grinch)_Russian_Man-Portable_Air-Defense_Missile_System_(MANPADS))
- [35] *Indian Army VSHORAD Tender: Russia Bags Another Huge Arms Deal*, Strategic Culture Foundation verkkokaartikkeli. posted 23.11.2018 [viitattu 25.3.2020] saatavissa: <https://www.strategic-culture.org/news/2018/11/23/indian-army-vshorad-tender-russia-bags-another-huge-arms-deal/>
- [36] Khan, M., Mittal, A & Pachauri, P. *PERFORMANCE EVALUATION OF SPARK IGNITION ENGINE RUNNING ON PETROL DOPED WITH VARIOUS ADDITIVES*. International Journal of Advance Research in Science and Engineering, Vol. No. 5, Issue No. 8. Elokuu 2016. [viitattu 28.3.2020] saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/306346166_PERFORMANCE_EVALUATION_OF_SPARK_IGNITION_ENGINE_RUNNING_ON_PETROL_DOPED_WITH_VARIOUS_ADDITIVES
- [37] Covington, A. *The Investigation of Combustion and Emissions of Jp8 Fuel in an Auxiliary Power Unit*. Georgia Institute of Technology. 2011. [viitattu 28.3.2020] saatavissa: <https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1774&context=etd>
- [38] Gonzales, R. *Diesel Exhaust Emission System Temperature Test*. U.S. Department of Agriculture. Joulukuu 2008. [viitattu 28.3.2020] saatavissa: <https://www.fs.fed.us/eng/pubs/pdf/08511816.pdf>
- [39] *How Much Power Is Needed To Hover ?*. Justdrones.com.au, verkkokaartikkeli. [viitattu 30.3.2020] saatavissa: <https://justdrones.com.au/how-much-power-is-needed-to-hover/>
- [40] *Miniature Brushless DC Motors, DBH-0472 Models*. Moog Components Group, valmistajan esite. [viitattu 30.3.2020] saatavissa: https://www.moog.com/content/dam/moog/literature/MCG/DBH-0472_Model_DtS.pdf
- [41] *US Air Force awards Raytheon high-power microwave device contract*. Jane's verkkokaartikkeli. Posted 25.9.2019 [viitattu 1.4.2020] saatavissa: <https://www.janes.com/article/91523/us-air-force-awards-raytheon-high-power-microwave-device-contract>
- [42] *Contracts For Sep. 23, 2019*. U.S. Dept of Defense, sopimukset. [viitattu 1.4.2020] saatavissa: <https://www.defense.gov/Newsroom/Contracts/Contract/Article/1968631/>

- [43] *US Air Force awards Raytheon high-power microwave device contract*, IHS Jane's verkkoartikkeli. [viitattu 20.2.2020] saatavissa: https://janes.ihs.com/Janes/Display/FG_2404581-JDW
- [44] *Forty-five down*. Raytheon artikkeli. [viitattu 1.4.2020] saatavissa: <https://www.raytheon.com/news/feature/forty-five-down>
- [45] Cole, S. *Counter-drone technologies are evolving to "counter" countermeasures*. Military embedded system verkkoartikkeli. [viitattu 1.4.2020] saatavissa: <http://mil-embedded.com/articles/counter-drone-technologies-are-evolving-to-counter-countermeasures/>
- [46] Pappalardo, J. *The Air Force IS Deploying Its First Drone-Killing Microwave Weapon*. Popular Mechanics verkkoartikkeli. [viitattu 1.4.2020] saatavissa: <https://www.popularmechanics.com/military/weapons/a29198555/phaser-weapon-air-force/>
- [47] *U.S. Navy Allowed to Use Persian Gulf Laser for Defence*. United States Naval Institute, verkkoartikkeli. [viitattu 2.4.2020] saatavissa: <https://news.usni.org/2014/12/10/u-s-navy-allowed-use-persian-gulf-laser-defense>
- [48] Judson, J. *Dynetics-Lockheed team beats out Raytheon to build 100-kilowatt laser weapon*. Defence News, verkkoartikkeli. [viitattu 2.4.2020] saatavissa: <https://www.defensenews.com/land/2019/05/16/dynetics-lockheed-team-beats-out-raytheon-to-build-100-kilowatt-laser-weapon/>
- [49] *High Energy Laser Tactical Vehicle Demonstrator (HEL TVD)*. U.S. Army Space and Missile Defence Command, vaatimuslista, [viitattu 2.4.2020] saatavissa: https://www.smdc.army.mil/Portals/38/Documents/Publications/Fact_Sheets/HEL_TVD.pdf
- [50] Lionis, A. *EXPERIMENTAL DESIGN OF A UCAV-BASED HIGH- ENERGY LASER WEAPON*. Maisterin tutkinto. Naval Postgraduate School, California, Yhdysvallat. 2016. s. 133. saatavissa: https://pdfs.semanticscholar.org/c86a/a97e353bac5401af37a8f1f14db7ede7edd3.pdf?_ga=2.26245118.2110406807.1586305934-841160026.1586305934
- [51] Hässler, B. *Athmospheric Transmission Models for Infrared Wavelengths*. Linköping University. 1998. saatavissa: <http://www.control.isy.liu.se/student/exjobb/xfiles/1909.pdf>
- [52] Havainnollistuskuva. Stratfor. [viitattu 2.4.2020] saatavissa: https://www.stratfor.com/sites/default/files/styles/wv_small/public/navy_laser_testing.png?itok=is5JRRzu

- [53] *Press commentary: Laser weapons offer precision and minimise collateral damage.* Rheinmetall verkkoartikkeli. [viitattu 6.4.2020] saatavissa: https://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/public_relations/themen_im_fokus/2016_02_23_laserwaffen_bieten_praezision/index.php
- [54] Dong, L. & Samson, B. *Fiber Lasers, Basics, Technology, and application*. CRC Press, ISBN 978-1-4987-2553-5
- [55] *Puolustushallinnon materiaalipolitiikka*. Puolustusministeriö. ISBN:978-951-25-2226-2. saatavissa: <https://www.defmin.fi/files/1831/materiaalipolitiikka.pdf>
- [56] Kosola, J. *Suorituskyvyn elinjakson hallinta*. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotateknii-
kan laitos, Julkaisusarja 5 No 7. 2007. Edita Prima Oy, Helsinki ISBN: 978-951-25-
1816-6
- [57] *Cost-effective*. Cambridgen yliopiston nettisanakirja. [viitattu 3.4.2020] saatavissa: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/cost-effective>
- [58] *About Forecast International*. Forecast international, yrityksen esittelysivusto. [viitattu 3.4.2020] saatavissa: <https://www.forecastinternational.com/about.cfm>
- [59] *20 to 57mm Cannon Ammunition (Europe)*. Forecast International, raportti keskikalii-
perin ammusten hinnoista ja toimittajista. [viitattu 3.4.2020] saatavissa: https://www.forecastinternational.com/archive/disp_pdf.cfm?DACH_RECNO=816
- [60] *All Systems Go: Navy's Laser Weapon Ready for Summer Deployment*. Yhdysvaltain
laivaston tiedote. [viitattu 4.4.2020] saatavissa: https://www.navy.mil/submit/display.asp?story_id=80172
- [61] *FACTBOX-Prices of arms in Mogadishu market*. Reuters, artikkeli aseiden hinnasta
Mogadishussa. [viitattu 5.4.2020] saatavissa: <https://www.reuters.com/article/arms-somalia-prices/factbox-prices-of-arms-in-mogadishu-market-idUSL9101815020090609>
- [62] Hogendoorn, E. & Stohl, R. *Stopping the Destructive Spread of Small Arms*. Center
for American Progress. [viitattu 5.4.2020] saatavissa: https://www.americanprogress.org/wp-content/uploads/issues/2010/03/pdf/small_arms.pdf
- [63] *TRADE REGISTERS*. Stockholm International Peace Research Institute, asekauppa-
rekiseri. [viitattu 5.4.2020], saatavissa: http://armstrade.sipri.org/armstrade/page/trade_register.php

- [64] *Air defence: Rheinmetall wins major orders in Asia and Europe – total value around €50 million.* Rheinmetall, verkkoartikkeli. [viitattu 5.4.2020] saatavissa:
https://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/public_relations/news/archiv/archive_2014/index~1_5056.php
- [65] *Contracts For Sept. 23, 2019.* U.S. DEPT OF DEFENSE, myönnetyt sopimukset. [viitattu 5.4.2020] saatavissa:
<https://www.defense.gov/Newsroom/Contracts/Contract/Article/1968631/>
- [66] *The U.S. Army Plans To Field the Most Powerful Laser Weapon Yet.* Popular Mechanics, verkkoartikkeli. [viitattu 5.4.2020] saatavissa:
<https://www.popularmechanics.com/military/weapons/a28636854/powerful-laser-weapon/>